

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Geometrické aspekty frézovacích nástrojů při náklonu

Geometric Aspects of Ball-end Milling Tools with
Inclination Tool Axis

Student: Aleš Kovář

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student:

Aleš Kovář

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Geometrické aspekty frézovacích nástrojů při náklonu
Geometric Aspects of Ball-End Milling Tools with Inclination Tool Axis

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu frézování tvarových ploch.
2. Frézovací nástroje pro obrábění tvarových ploch.
3. Geometrie kulových (sférických) frézovacích nástrojů.
4. Změna geometrie kulových (sférických) frézovacích nástrojů při náklonu.
5. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivity obrábění s využitím CAD/CAM systému-Disertační práce*. Ostrava : Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.
- [2] SADÍLEK, M.; ČEP, R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, s. 13 – 18. ISBN 80-214-3239-X.
- [3] MRKVICA, I. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 2008, 148 s., ISBN 978-80-248-1053-9.
- [4] HUMÁR, A. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. Brno : CCB, s.r.o. 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23. 5. 2011



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, же Высoкá школа ба́нская – Техни́кая универзита Ostrava (дále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, же оdevздáні́м své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Aleš Kovář

Adresa trvalého pobytu autora práce:

ČSA 31A, 787 01 Šumperk

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KOVÁŘ, A. *Geometrické aspekty frézovacích nástrojů při náklonu : bakalářská práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 49 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

Bakalářská práce se zabývá geometrickými aspekty frézovacích nástrojů při náklonu nástroje. V úvodu je představena problematika současného stavu obrábění tvarových ploch s jejich souhrnem možností. Navazuje rozbor nepoužívanějších frézovacích nástrojů pro obrábění těchto ploch s jejich využitím. V hlavní části práce je řešena problematika geometrie frézovacích nástrojů a změna geometrie frézovacích nástrojů při náklonu pro jednotlivé konstrukční provedení břitu nástroje. Závěrem je provedeno srovnání vybraných frézovacích nástrojů od jednotlivých výrobců z hlediska náklonu, řezných podmínek a geometrie nástroje, kde se zkoumá maximální náklon při zachování současné geometrie nástroje s ohledem na systém řezných podmínek.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KOVÁŘ, A. *Geometric Aspects of Ball-end Milling Tools with Inclination Tool Axis : Bachelor Thesis.* Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Working and Assembly, 2011, 49 p. Thesis head: Sadílek, M.

This bachelor thesis deals with the geometric aspects of milling tools in the tool angle. The introduction presents a problem of the current state of contoured surfaces with their set of possibilities. It follows an analysis of the most common milling tools for machining of these surfaces with their use. The main part is solved the problems of geometry of milling tools and change the geometry of milling tools with particular inclination for the implementation of cutting edge design. Finally, it compares the selected milling tools from different manufacturers in terms of angle, cutting conditions and tool geometry, which examines the maximum tilt while maintaining the present, the tool geometry with respect to a system of cutting conditions.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
0 ÚVOD	9
1 PROBLEMATIKA FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH	10
1.1 Frézování tvarových ploch pomocí kulového nástroje	11
1.2 Poloha kopírovacího nástroje vůči obrobku	12
1.3 Aplikace HSC při frézování tvarových ploch	14
1.4 Uplatnění 5-osého frézování při obrábění tvarových ploch	15
2 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE PRO OBRÁBĚNÍ TVAROVÝCH PLOCH	18
2.1 Přehled frézovacích nástrojů	18
2.1.1 Monolitní frézovací nástroje	19
2.1.2 Frézovací nástroje s VBD	21
2.2 Řezné materiály frézovacích nástrojů	24
3 GEOMETRIE KULOVÝCH FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ	25
3.1 Souřadnicové soustavy a roviny v nich	25
3.2 Nástrojové a pracovní úhly řezné geometrie	28
3.3 Geometrie monolitního frézovacího nástroje	30
3.4 Geometrie frézovacího nástroje s VBD	31
3.5 Stanovení geometrických parametrů břitu	32
4 ZMĚNA GEOMETRIE KULOVÝCH FRÉZ PŘI NÁKLONU	33
4.1 Definování pracovní geometrie břitu	34
4.2 Frézování s využitím náklonu nástroje	34
4.3 Strategie frézování naklopeným nástrojem	38
4.4 Závislost náklonu nástroje na drsnost povrchu	40
4.5 Metodika hodnocení náklonu na změnu geometrie nástroje	41
5 ZÁVĚR	47
Seznam použité literatury	48

Seznam použitých značek a symbolů

Al_2O_3	řezná keramika na bázi oxidu hliníku	-
A_α	hlavní hřbet nástroje	-
A_γ	čelo nástroje	-
CAD	počítačem podporovaný návrh	-
CAM	počítačem podporovaná výroba	-
CNC	počítačem číslicově řízený stroj	-
D_c	průměr frézovacího nástroje	[mm]
D_{ef}	efektivní průměr nástroje	[mm]
D_z	průměr přechodového ostří	[mm]
HSC	vysokorychlostní obrábění	-
HSM	vysokoposuvové obrábění	-
ISO	mezinárodní norma	-
KBN	kubický nitrid boru	-
NC	číslicově řízený stroj	-
PKD	polykrystalický diamant	-
PM RO	rychlořezná ocel vyrobená práškovou metalurgií	-
P_f	nástrojová rovina boční	-
P_n	nástrojová rovina normálová	-
P_o	nástrojová rovina ortogonální	-
P_p	nástrojová rovina zadní	-
P_r	nástrojová rovina základní	-
P_s	nástrojová rovina ostří	-
P_{fe}	pracovní rovina boční	-
P_{oe}	pracovní rovina ortogonální	-
P_{pe}	pracovní rovina zadní	-
P_{re}	pracovní rovina základní	-
P_{se}	pracovní rovina ostří	-
RO	rychlořezná ocel	-
Si_3N_4	řezná keramika na bázi nitridu křemíku	-
SK	slinutý karbid	-
TiAlN	povlak (titan-hliník-nitrid)	-
VŘH	vyměnitelná řezná hlava	-

a_p	hloubka řezu	[mm]
a_e	šířka řezu	[mm]
n	počet otáček vřetene	[min ⁻¹]
v	rychlost hlavního pohybu	[m.min ⁻¹]
v_e	rychlost hlavního pohybu v pracovní souřadnicové soustavě	[m.min ⁻¹]
v_{ef}	efektivní řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	rychlost posuvu	[mm.min ⁻¹]
v_{fe}	rychlost posuvu v pracovní souřadnicové soustavě	[mm.min ⁻¹]
α_f	úhel hřbetu v rovině boční	[°]
α_n	úhel hřbetu v rovině normálové	[°]
α_o	úhel hřbetu v rovině ortogonální	[°]
α_p	úhel hřbetu v rovině zadní	[°]
β_f	úhel břitu v rovině boční	[°]
β_n	úhel břitu v rovině normálové	[°]
$\beta_{n(f)}$	úhel naklonění nástroje v rovině kolmé na posuv (v rovině posuvu)	[°]
β_o	úhel břitu v rovině ortogonální	[°]
β_p	úhel břitu v rovině zadní	[°]
γ_f	úhel čela v rovině boční	[°]
γ_n	úhel čela v rovině normálové	[°]
γ_o	úhel čela v rovině ortogonální	[°]
γ_p	úhel čela v rovině zadní	[°]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]
λ_s	úhel sklonu ostří	[°]
ψ_r	doplňkový úhel nastavení	[°]

0 Úvod

V současné době, kdy se trh obrábění rozvíjí do čím dál většího prostoru a zaujímá strategické postavení v dnešním světě strojírenství, klade si stále nové, přesnější a především levnější metody výroby strojních součástí. K těmto požadavkům se řadí především snížení strojních časů, zlepšení kvality povrchů součástí, zvýšení trvanlivosti obráběcích nástrojů a potřeba neustálého zvyšování jakosti celé výroby například pomocí vhodného zvolení CAD/CAM systémů.

Obrábění stále patří k nejpoužívanější metodě výroby strojních součástí. Z tohoto důvodu je třeba věnovat této problematice dostatečnou pozornost a stále větší měrou prohlubovat již získané znalosti a dovednosti. Zaměříme-li se na oblast frézování, budeme moci konkrétně specifikovat předloženou problematiku.

Frézování patří k velice produktivnímu způsobu obrábění bez ohledu na to, jestli se jedná o výrobky jednoduché, či naopak tvarově složité. V případě frézování pomocí kulového nástroje při náklonu nástroje o úhel $\beta_{n(f)}$ je problematika poměrně složitější, pokud zde zakomponujeme kromě statických a dynamických složek jednotlivých řezných sil i kmitání či chvění celé technologické soustavy.

V této bakalářské práci se budeme ubírat ke geometrickým aspektům kulových (sférických) frézovacích nástrojů při náklonu. Při náklonu působí na frézovací nástroj jiná síla řezání než při frézování nástrojem, který je nastaven kolmo vůči obráběnému povrchu. Hlavní výhoda frézování při náklonu nástroje je v eliminaci nežádoucích vlivů, které nám negativně ovlivňují proces obrábění. Především pak odstranění nulové řezné rychlosti v ose frézovacího nástroje.

Stejně jako problematika sil řezání (u obrábění kulovou frézou při náklonu nástroje) je i nastavení ideální pracovní geometrie nástroje velice problematickou záležitostí. Každý nástroj má vlastní stabilní nástrojovou geometrii, která je dána konstrukčním návrhem a samotnou výrobou nástroje. Účinné změny geometrie lze dosáhnout způsobem úpravy pracovní geometrie během řezného procesu. Geometrie nástrojová i pracovní geometrie nástroje mají zásadní vliv na výsledný efekt celého procesu obrábění. Právě z tohoto důvodu je třeba věnovat této problematice dostatečnou pozornost.

1 Problematika frézování tvarových ploch

Frézování je strojní třískové obrábění kovů vícebřítým nástrojem, kde hlavní pohyb (rotační) koná nástroj a vedlejší pohyb (přísuv, posuv) obrobek. Klasicky probíhá ve třech osách, ve více než třech osách pracují více-osá obráběcí centra. Frézovací stroj se nazývá frézka, frézovací nástroj fréza. Frézování se dělí na sousledné, kdy se nástroj otáčí ve směru pohybu stolu s obrobkem, a nesousledné, kdy je tomu opačně.

Frézování má široké uplatnění při výrobě rovinných ploch u prostých součástí, ale především při obrábění složitých tvarových ploch při dodržení přesnosti rozměru a jakosti výrobku. V posledních letech se rozmáhá výroba nespočetného množství součástí a to různých tvarů. Odraz lze pozorovat v automobilovém průmyslu, kde obrábění tvarových ploch tvoří významnou část. Frézování tvarových ploch v dnešní době nelze efektivně realizovat bez použití moderní výpočetní techniky, která se významným způsobem podílí na zefektivnění výroby, a také podporuje návrh tvarově složité součásti. Mezi nejvíce používané tvarově složité součásti patří např. lodní šrouby, lopatky oběžných kol, lopatková kola turbín, vačky, vrtule, šablony, lisovací a vstřikovací formy, kovací zápustky pro přesné kování apod.

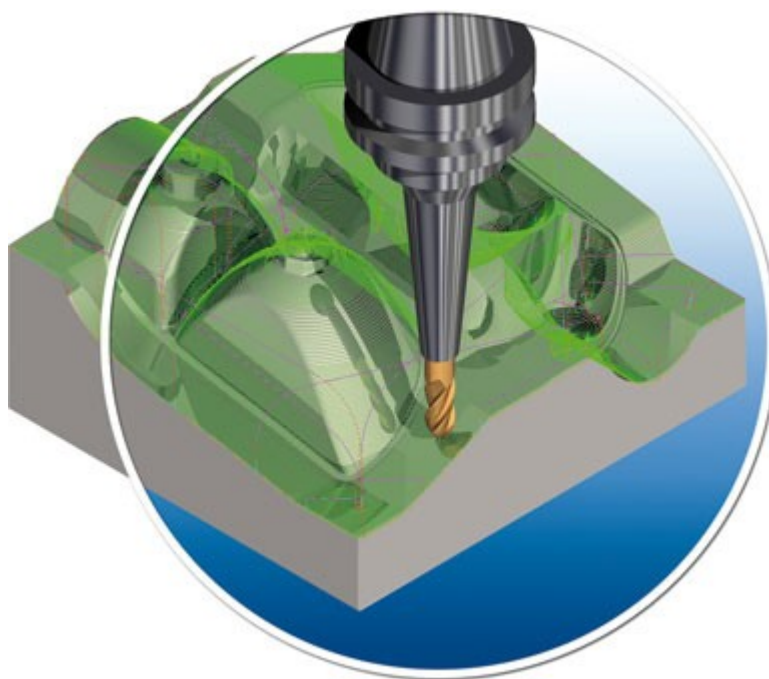
Tvarové plochy různých tvarů se objevují zejména v automobilovém, leteckém a lodním průmyslu. Strategické postavení zaujímají také např. u vodních elektráren a v neposlední řadě také u tvářecích strojů. Frézování tvarových ploch lze realizovat:

- Kopírováním frézovacího nástroje.
- Využitím NC (Numerical Control) techniky.
- Frézováním tvarovými nástroji.

Vzhledem k nárůstu zájmu frézování kulovými nástroji bylo vynalezeno ponorné frézování. Ponorné frézování bylo navrženo, aby bylo možné odebírat velké množství materiálu, a je speciálně určeno pro aplikace, kde je potřebné dlouhé vyložení nástroje např. v 3D frézování. Při obrábění ponorným frézováním se využívá optimálních řezných podmínek za předpokladu většího vyložení nástrojů oproti konvenčním operacím.

1.1 Frézování tvarových ploch pomocí kulového nástroje

Cílem této práce je zaměření se pouze na efektivní nástroj pro obrábění konkávních a konvexních tvarů. Tímto obráběcím nástrojem je kulová (sférická) fréza. Efektivní obrábění ve všech směrech zajišťuje na čelní straně oblý břit nástroje. Aplikace tohoto typu nástroje uživateli nabízí především hospodárnost a spolehlivost při obrábění. Tento typ nástroje lze považovat za mnohostranně využitelný (Obr. 1).



Obr. 1: Ukázka frézování tvarových ploch pomocí kulového nástroje [5]

Kulové (sférické) nástroje lze označit do jisté části jako klíčové nástroje s ohledem na jejich mnohostrannou použitelnost na moderních obráběcích strojích. Kulové či stopkové nástroje zastupují skoro polovinu všech nástrojů použitých na obráběcích centrech. Aplikace těchto nástrojů lze využít pro dosažení vysoké přesnosti obráběných tvarů a rozměrů, a to i při obrábění těžkoobrobitelných materiálů. Z tohoto důvodu se těmito nástroji provádí převážná většina operací. Použití těchto nástrojů zaručuje rovněž delší trvanlivost břitů nástrojů a vyšší produktivitu obrábění. Pro dosažení kvalitních výsledků je důležitým aspektem rovněž správné použití odpovídajících řezných podmínek.

Prvotním předpokladem pro správné využití kulových fréz je dodržení následujících doporučení dle [1]:

- Vzdálenost mezi upínacím pouzdem a břitem nástroje musí být co nejmenší.
- Při hrubování upřednostňovat sousledné frézování.
- Používat největší možný průměr nástroje.
- Při velkém vyložení nástroje zvolit malý průřez třísky a velký posuv, zvážit možnost použití držáků nástrojů opatřených tlumičem vibrací.
- Stabilní upnutí obrobku.
- Využívat v co největší míře případů VBD s pozitivní geometrií břitu.
- Rychlovýměna nástrojů by měla být co nejpřesnější a nejstabilnější.
- Zajistit odvod třísek.
- Zkontrolovat vůli uložení včetně apod.

Při procesu obrábění sférickými nástroji standardním způsobem, kde obrobek a nástroj spolu svírají pravý úhel, zde vzniká na kulovém ostří v ose nástroje nulová řezná rychlost. V této poloze dochází pouze k zatlačování nástroje do povrchu obrobku. Právě z tohoto důvodu zde dochází k nežádoucím vlivům jako je například:

- Pěchování odebíraného materiálu.
- Vznikající teplota řezání.
- Zvýšená tvorba nárůstků apod.

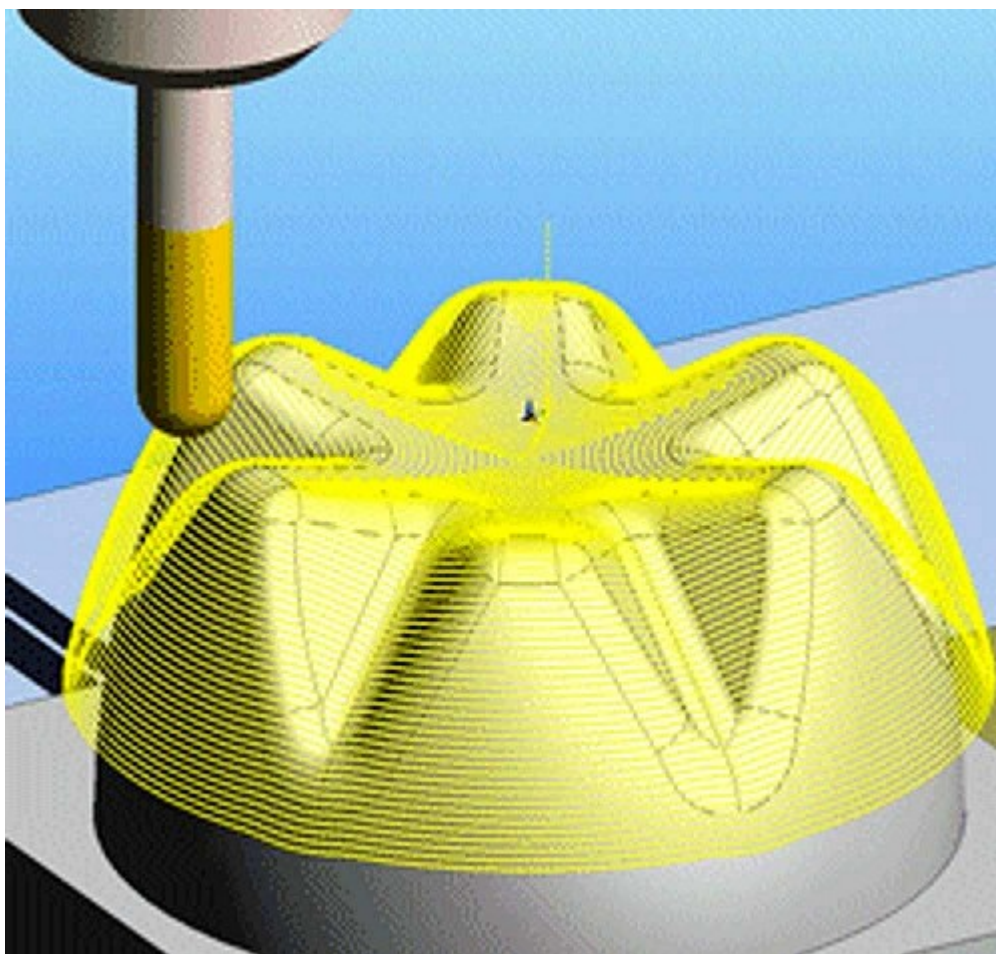
Tyto jevy mají za následek zhoršení jakosti povrchu obráběného materiálu a snížení trvanlivosti nástroje, v nejhorším případě jeho vyštípnutí. Zmíněné jevy lze eliminovat naklopením nástroje nebo obrobku. [2]

1.2 Poloha kopírovacího nástroje vůči obrobku

Při obrábění tvarových ploch je velice důležitým aspektem poloha nástroje vůči obrobku. Při procesu obrábění může kopírovací nástroj vykonávat řadu pohybů. V standardním případě se jedná pouze o podélný a příčný posuv, případně kruhový.

V případě simultánního obrábění je posuv řízen plynulým pohybem minimálně ve 3 osách součastně. Při frézování k hloubce řezu a posuvu se řadí ještě jeden parametr a to je šířka řezu a_e , která je závislá na technologické operaci a geometrických parametrech řezné části nástroje, a společně s tloušťkou odřezávané vrstvy určuje průřez odřezávané vrstvy v rovině kolmé na vektor rychlosti řezného pohybu. U kulového kopírovacího nástroje je šířka obrábění dána efektivním průměrem nástroje D_{ef} a axiálním přísuvem nástroje (hloubkou řezu) a_p . Hloubku řezu lze definovat jako vzdálenost mezi obráběným a obrobeným povrchem obrobku měřená kolmo na obrobený povrch.

V současně době rozšířenou dokončovací metodou je metoda frézování 3D tvarových ploch kulovou kopírovací frézou. V mnoha těchto případech se aplikuje obrábění bez použití náklonu nástroje a tím i jeho středem, kde se řezná rychlost blíží nule. Zvláštním případem je obrábění velice strmých tvarových ploch. V těchto případech má kopírovací nástroj vzhledem k základně stroje nulový sklon, ale vzhledem k strmému obráběnému povrchu lze sklon nástroje definovat (Obr. 2).



Obr. 2: Příklad trajektorie nástroje tvarové plochy [3]

Pro dosažení kvalitní souvislé povrchové vrstvy s jednotnými parametry a mechanickými vlastnostmi je třeba stabilně dodržet stále stejné postavení nástroje vůči obrobku. Tento aspekt lze doplnit o aplikaci stejného typu nástroje a stejných technologických podmínek při procesu frézování. Při obrábění povrchu materiálu za použití moderního 5-ti osého simultánně řízeného obráběcího centra s genezí trajektorie kopírovacího nástroje lze dosáhnout těchto kvalitních výsledků za pomoci vhodného softwaru. Takto řízené obrábění povrchu materiálu bude vykazovat lepší celistvost povrchu, větší odolnost proti zatížení a také bude produkovat méně únavových trhlin oproti povrchu obrobeného konvenčním obráběním.

1.3 Aplikace HSC při frézování tvarových ploch

Mezi základní HSC technologie patří obrábění vysokými rychlostmi, suché a tvrdé obrábění. Zmíněné technologie disponují společným základem, který vychází z příbuznosti jevů řezného procesu při zvyšování řezné rychlosti. Suché obrábění sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití procesních kapalin a redukci nákladů na jejich filtraci a recyklování. Tvrdé obrábění znamená obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitů náhradou za dříve užívanou technologii broušení [2].

Podstatou vysokorychlostního obrábění je použití výrazně vyšších otáček vřetena a posuvů za účelem dosažení výjimečně vysokých parametrů obrábění, které nejsou v běžné praxi obvyklé. Kolem vlastní definice týkající se vysokorychlostního obrábění panuje stále nejednoznačnost. Pro stanovení přesné definice je třeba zakomponovat do obsahu i taková fakta jako je např. aktuální řezná rychlost, závislost obráběného materiálu a typ řezné operace. Jednou prostou definicí lze charakterizovat metodu HSC jako metodu, při které se obrábí řeznou rychlostí, jež dosahuje pěti až desetinásobku řezné rychlosti konvenčního obrábění pro určitou řeznou operaci. Strategické postavení zaujímá metoda HSC u frézování tvarových ploch, kde tímto způsobem dochází k výraznému snížení výrobních časů, snížení opotřebení nástroje a zajištění vyšší jakosti obrobených součástí.

HSC technologie úzce souvisí pojem HSM, které zahrnuje v sobě jak vysokou řeznou rychlost, tak vysokou posuvovou rychlost vysoce optimalizované a strategicky navržené dráhy nástroje. Aplikace této metody je vždy iniciována snahou o snížení nákladů a zvýšení objemu výroby při současném dodržení kvality.

Při vysokorychlostním obrábění se teplota třísky blíží tavné teplotě obráběného materiálu. Tříska při průchodu střižnou rovinou náhle zvýší teplotu v celém svém průřezu. Změkne a sníží svou přítláčnou sílu na čelo nástroje. Třecí síla i celkový řezný odpor klesne, zvětší se úhel smykové roviny a ztenčí se průřez třísky a současně se zvýší rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny. Vlivem vysoké odchozí rychlosti nestačí tříska předat teplo nástroji ani obrobku a naprostá většina tepla odchází s třískou. Potom i přes celkově značný nárůst tepla se omezí opotřebení nástroje. Důsledkem poklesu řezných sil a snížením tepelného toku do obrobku stoupne i přesnost obrábění. [4] Vysoká teplota třísky je pozitivním činitelem efektů vysokorychlostního obrábění.

1.4 Uplatnění 5-osého frézování při obrábění tvarových ploch

V současné době není u nás ještě pětiosé obrábění příliš rozšířeno, protože stroje schopné pracovat v pěti osách nejsou zrovna levnou záležitostí. Nicméně trend posilování rozšíření těchto strojů bude i nadále stoupat, jelikož neustále dochází k inovacím, a pro zvyšování produktivity a tím schopnosti konkurovat je zapotřebí tento vývoj sledovat.

Pětiosé obrábění umožňuje obrobit dílec z více stran na jedno upnutí či obrábět tvarové plochy jinak nevyrobitelné, ale i obrábět tvarovou plochu břity kulové frézy v místě s předepsanou geometrií, a to za nastavených řezných podmínek. Podél ostří kulové frézy se mění nejen řezné podmínky, ale i řezná geometrie. Tento systém frézování má zásadní důležitost pro výrobu nástrojů a forem, protože nabízí lepší možnosti obrábění a dosahuje lepší jakosti povrchu.

Konvenční pětiosá frézka má přídatné vřeteno s možností výkyvu. Pětiosé obrábění např. v SURFCAMu pak umožňuje ovládání pěti simultánně se pohybujících os, kompenzaci nepřesností stroje a rozměrů nástroje, interpolaci různých obráběcích strategií a podobně. Lze provádět pětiosé obrábění více ploch s kontrolou podřezání. Pětiosá vertikální obráběcí centra slouží pro přesné pětiosé obrábění forem, lopatek oběžných kol (Obr. 3) nebo pro obrábění tvarově složitých dílců na jedno upnutí. Problematika 5osého obrábění je samostatnou disciplínou, která požaduje vysoká kritéria na hardware (stroj a nástroj), software (CAM systém) a v neposlední řadě na obsluhu.

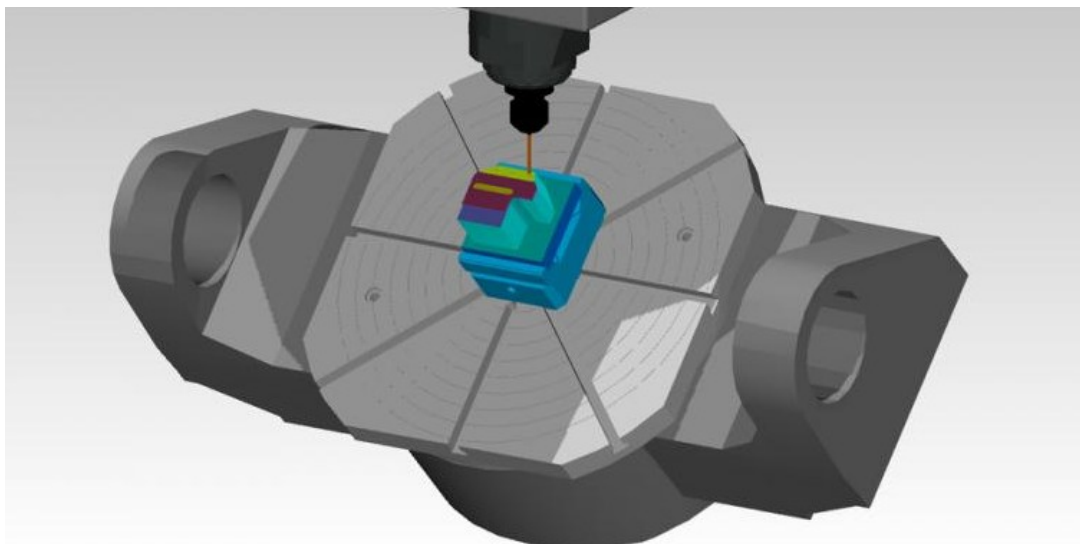


Obr. 3: Ukázka obrábění lopatek oběžného kola pomocí 5-osého frézování [5]

V případě modulů pro 5osé plynulé obrábění je nutností základ pro sestavení obráběcích metod tak, aby aplikace těchto modulů splňovala nejnáročnější požadavky ve výrobních oborů jako je především automobilový a letecký průmysl, energetiku nebo výrobu forem. Účelem je poukázat na razantní snížení strojního času při komplexním obrobením součásti na jedno upnutí. Použití tohoto systému kromě zásadní redukce obráběcích časů také navíc zvyšuje přesnost samotné výroby, jelikož dochází k eliminaci potenciálních chyb při seřizování stroje. Velice pozitivním faktorem je také možnost použít menšího vyložení nástrojů a dosáhnout přesnějších kvalit dokončeného povrchu, při nichž se nástroj plynule naklápí a tím tak neustále udržuje optimální kontaktní bod s obráběnou plochou. Pětiosé frézování v EdgeCAMu je podpořeno kompletní simulací stroje pro přehlednou vizualizaci obráběcího procesu a bezpečnost stroje. Právě pro 5osé simulace je zásadní správné dodržení simulace stroje, která kontroluje kinematiku stroje a její hraniční hodnoty. Kontroluje tak možné kolize všech důležitých částí obráběcího stroje.

Frézování - 5 os polohování

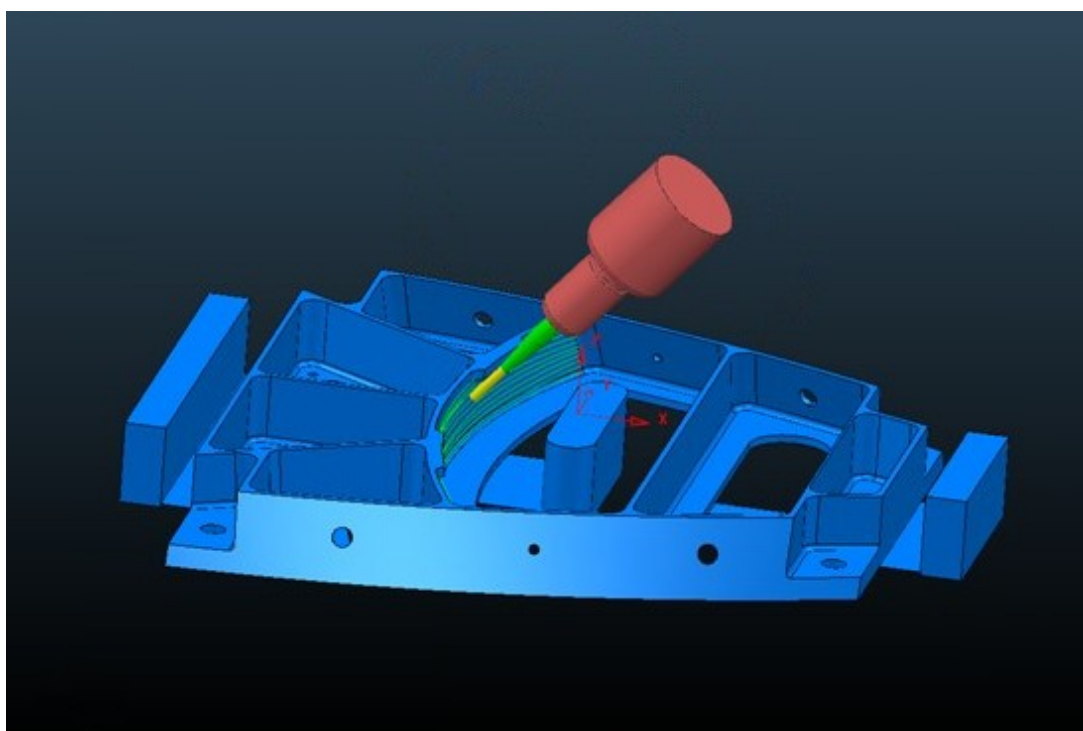
Při 5osém frézování polohováním dochází k natočení stroje před najetím na obráběcí souřadnice. Stroj tedy vykonává natáčecí pohyb nad obrobkem a teprve poté najíždí na souřadnice obrábění. Pracovní pohyb se tak odehrává pouze v osách X, Y, Z. Zvláštní skupinou polohování je 4osé indexování osy A, B, C. [5]



Obr. 4: Zobrazení simulace při 5osém frézování polohováním [5]

Frézování - 5 os souvisle

Postprocesor pro souvislé 5osé frézování je paradoxně jednodušší. Stroj se naklápí na cílové souřadnice souvisle nad obrobkem. Toto naklápění se rovná pozici první obráběcí souřadnice. Dále se stroj naklápí při pracovním pohybu souvisle ve všech osách X, Y, Z, A, B, C. Zároveň může pracovat 5 os. [5]



Obr. 5: Zobrazení simulace při 5osém frézování souvislém [5]

2 Frézovací nástroje pro obrábění tvarových ploch

Obecně lze říct, že každý obráběný materiál vyžaduje jiný přístup k jeho obrábění, tzn. změna geometrie frézovacího nástroje, jiný počet břitů, rozdílný úhel zkosení břitu apod.

Mezi základní frézovací nástroje pro obrábění tvarových ploch se řadí:

- Frézovací nástroje na frézování drážek (speciální nástroje pro drážkování)
- Nástroje pro frézování ozubených kol (odvalovací a kotoučové nástroje)
- Kulové (sférické) frézovací nástroje (pro kopírování a 3D CNC frézování)
- Frézovací nástroje na ponorné frézování (speciální určení v 3D frézování)

Při obrábění složitých tvarových ploch využíváme různých druhů tvarových frézovacích nástrojů. Nástroji pro obrábění tvarových ploch se většinou frézují krátké, jednoduché, ale i složitější tvarové profily. Těmito nástroji lze na jeden záběr (průchod) odfrézovat kompletní tvarový povrch nebo jeho část. V současné době se pro frézování tvarových ploch nejvíce prosazují nástroje s oblým břitem. Z důvodu dosažení velmi kvalitního povrchu po obrobení součásti.

2.1 Přehled frézovacích nástrojů

V této bakalářské práci se budeme zabývat pouze kulovými frézovacími nástroji. Tento typ nástroje je nejvhodnějším nástrojem pro frézování tvarově členitých a složitých ploch. Pro tento nástroj není problém vyfrézovat prakticky jakoukoli zakřivenou plochu.

2.1.1 Monolitní frézovací nástroje

Frézovací nástroje tohoto typu jsou zhotoveny jako jednolitý (pevný) celek nástroje, tzn. řezná část a těleso nástroje je z jednoho materiálu. Výhodou je jednoduchá výroba a možnost velkého počtu přestření. Nevýhodou je velká spotřeba kvalitního nástrojového materiálu, složitější tepelné zpracování a renovace.

Pro dokončení obrábění tvarových ploch se zásadně využívají kopírovací nástroje kulové (sférické). Aplikace nástroje v různých provedení, např. monolitní frézovací nástroje - krátké, dlouhé provedení nástroje, 2-zubé (Obr. 6) v tzv. celokarbidovém provedení. Nástroj je zhotoven z vysoce výkonné oceli vyrobené pomocí práškové metalurgie. Má homogenní strukturu, která se projevuje vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří nástroje. Provedení kopírovacího nástroje s půlkruhovými břity – krátké a dlouhé provedení (Obr. 7). V tomto případě je nástroj vyroben z vysoce výkonné oceli s dobrou houževnatostí a výbornou teplotní odolností. Vhodná především pro frézování vysoce pevných materiálů, austenitických ocelí a ocelí pro tváření za tepla.



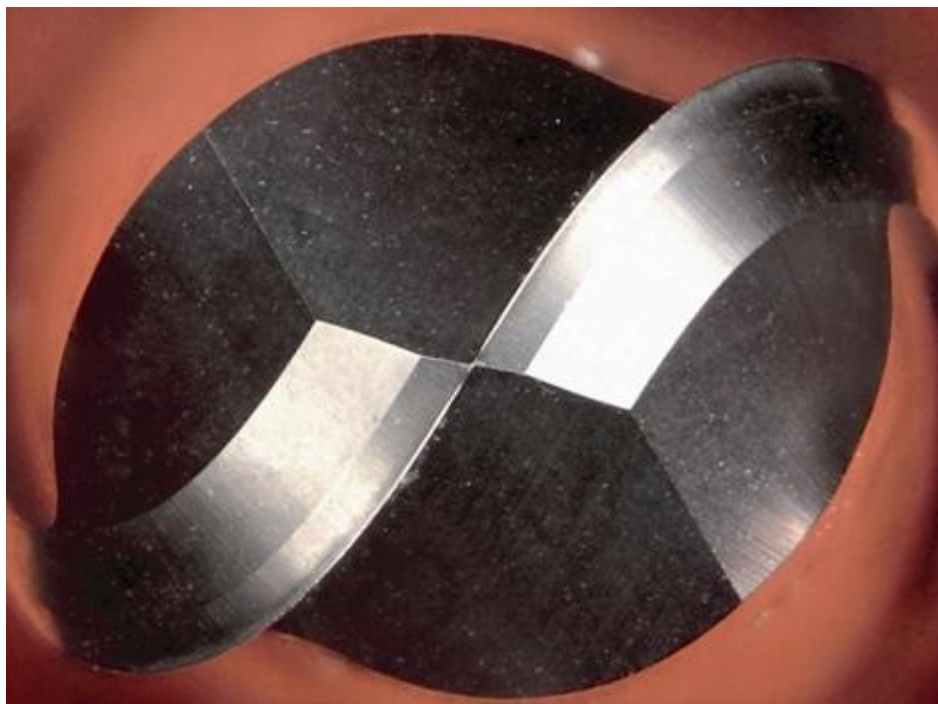
Obr. 6: Fréza kopírovací – krátká, 2-zubá, PM [6]



Obr. 7: Fréza kopírovací – krátká, s půlkruhovými břity [6]

Vysokovýkonné monolitní nástroje

Mezi tento typ frézovacích nástrojů se řadí nová generace toroidních a kulových fréz na grafit, která se vyznačuje vysokou přesností – průměr stopky v toleranci $h5$ až $h4$, tolerance rádiusu $\pm 0,005$ mm a tolerance házivosti do 0,003 mm. Pro tuto generaci byl vyvinut nový druh diamantového povlaku. [7]



Obr. 8: Hrubovací kulová fréza Sphero XR [7]

Pro zvýšení efektivity v oblasti 3D obrábění lze využívat dvě řady kulových nástrojů. A to Sphero XR (Obr. 8) pro hrubování a Sphero XF pro dokončovací operace. Zásadní rozdíl mezi těmito dvěma řadami lze pozorovat v mikrogeometrii. V případě hrubovacích nástrojů je více zaoblena řezná hrana a to z toho důvodu, aby byla schopna snést vyšší mechanické zatížení a byla odolná proti vylamování. Tato speciální úprava se provádí až po napovlakování nástroje. U dokončovacích nástrojů řady Sphero XF je naopak mikrogeometrie orientována na co nejhladší a nejčistší řez, aby bylo dosaženo vysoké přesnosti a velmi kvalitního opracování.

Drtivá většina těchto nástrojů nové generace prošla inovativní konstrukční přeměnou. Jedná se o konstrukční přeměnu s aplikací speciálních prvků, které zvyšují výkonnost, spolehlivost a životnost těchto nástrojů.

Aplikace těchto prvků má velmi pozitivní vliv na chování nástroje v řezu. Při procesu obrábění vznikají nežádoucí vibrace, ale tohle lze tlumit použitím nástroje s variabilní šroubovicí a nestejnoměrným průřezem nástroje. Pro dosažení vyšší životnosti a vyšší jakosti obráběného povrchu použijeme čelní fazetku a zabroušení zubu.

2.1.2 Frézovací nástroje s VBD

V dnešní době se mechanické upínání břitů velice rozšířilo a osvědčilo. Je zřejmé, že jeho nárůst i nadále poroste.

Podstatou tohoto systému je upevňování přesných vyměnitelných řezných částí (zpravidla vyměnitelných břitových destiček) vyrobených z vhodných řezných materiálů, které se mechanicky upínají do lůžka v tělese nástroje. Pozitivním faktorem u tohoto systému je to, že v případě opotřebení břitu je možno břit snadno a rychle vyměnit. Pro zvýšení efektu obrábění se v mnoha případech aplikuje použití vícehranných destiček, kde je možnost po otupení jednoho břitu destičku uvolnit a pootočením nastavit nový pracovní břit. Po dosažení celkového opotřebení všech břitů je třeba destičku vyměnit.

Frézovací nástroje s VBD se liší od monolitních frézovacích nástrojů zejména průměrem nástroje, typem prováděných operací a kvalitou opracování součástí. Pro frézovací nástroje s VBD není stanoven horní limit optimálního průměru nástroje. Naproti tomu existuje z konstrukčních důvodů dolní hranice průměru nástroje. U monolitních frézovacích nástrojů je situace opačná, které je možné v případě nástrojů používaných pro mikroobrábění vyrobit v průměrech pouhých desetin milimetrů.

Polokulová fréza K=2 pro kopírovací frézování

Kulové frézovací nástroje jsou navrženy pro dosažení vyššího výkonu a lepší spolehlivosti v aplikacích kopírovacího frézování.

Tento nástroj pro HSC obrábění může dosahovat velmi vysokého úběru materiálu díky tuhé konstrukci a dvěma efektivním zubům $K=2$. Na trhu se prezentuje velice produktivní fréza R218.20 (Obr. 9). Nástroj nabízí velice dobré řešení v upnutí destiček, které odstraňuje namáhání upínacího šroubu a zamezuje pootočení destiček. Tento frézovací nástroj má velký prostor pro utváření třísky při současném zachování tuhosti tělesa nástroje. Na destičce jsou dva břity (centrální a okrajový). Nástroj disponuje celkovou

tuhostí a pevností břitů. Tím nástroje získávají maximální bezpečnost a spolehlivost. Proto jsou velice vhodné pro použití v automatizované výrobě a na moderních obráběcích strojích. Tuhost nástroje umožňuje použití vysokého výkonu, a proto je aplikace kulových nástrojů také cenově efektivní. Všestrannost tohoto nástroje dokumentuje rozsah použitelnosti od polodokončovací až po těžké hrubování a to u všech druhů materiálů.

Efektivní snížení řezných sil interpretuje řezná hrana destičky, která je ve speciálním tvaru „S“. Z tohoto důvodu má destička konstantní úhel čela v celé délce řezné hrany. Pozitivní axiální úhel čela dává průběh hladkého řezání a umožňuje použití vrcholového obrábění. Řezný nástroj má zesílený střed díky velkému rádiusu pro odvod třísek a zesílení okraje destičky zabraňuje lomu. Použitá nástrojová geometrie s úhlem hřbetu v celé délce řezné hrany se významným způsobem podílí na vzniku velmi malých řezných sil, a tím zvýšení životnosti. VBD jsou navrženy ve dvou různých geometriích a materiálových třídách. Velice důležitá je samotná volba správné možnosti parametrů pro danou aplikaci.



Obr. 9: Polokulová fréza $K=2$ s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) [8]

Stopkové frézy s kulovými vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD)

Strategické postavení v oblasti obrábění tvrdých materiálů (tvrdé obrábění) zaujímá výroba forem a zápuštěk. Tento typ nástroje je předurčen pro kompletní obrábění forem a zápuštěk. Vzhledem k ceně představují výhodnou alternativu k monolitním kulovým frézám v značném rozsahu průměrů. Unikátní sortiment délkových a průměrových variant opatřuje výbornou adaptaci různým technickým požadavkům na obrábění. Aplikace nového širokorozsahového jemnozrnného karbidu v oblasti výroby těchto destiček má pozitivní ohlas při obrábění měkkých a tvrdých ocelí.

Pozitivní hlediska stopkových fréz s kul. VBD jsou následující:

- Nízká zrnitost karbidu s vysokou odolností proti opotřebení.
- Povlak TiAlN pro univerzální použití.
- Speciální a velmi přesné „V“ uložení VBD.
- Vysoká přesnost průměru VBD v 0,01 mm.
- Velmi dobrá tuhost a stabilita konstrukce nástroje.
- Jeden držák - různé geometrie řezné hrany.
- Možnost HSC - vysokorychlostního obrábění.
- Šroubovací provedení držáku s IKZ zajišťuje dobrou trvanlivost.



Obr. 10: Ukázka stopkového nástroje s VBD a šroubovacího nástroje s kulovou VBD

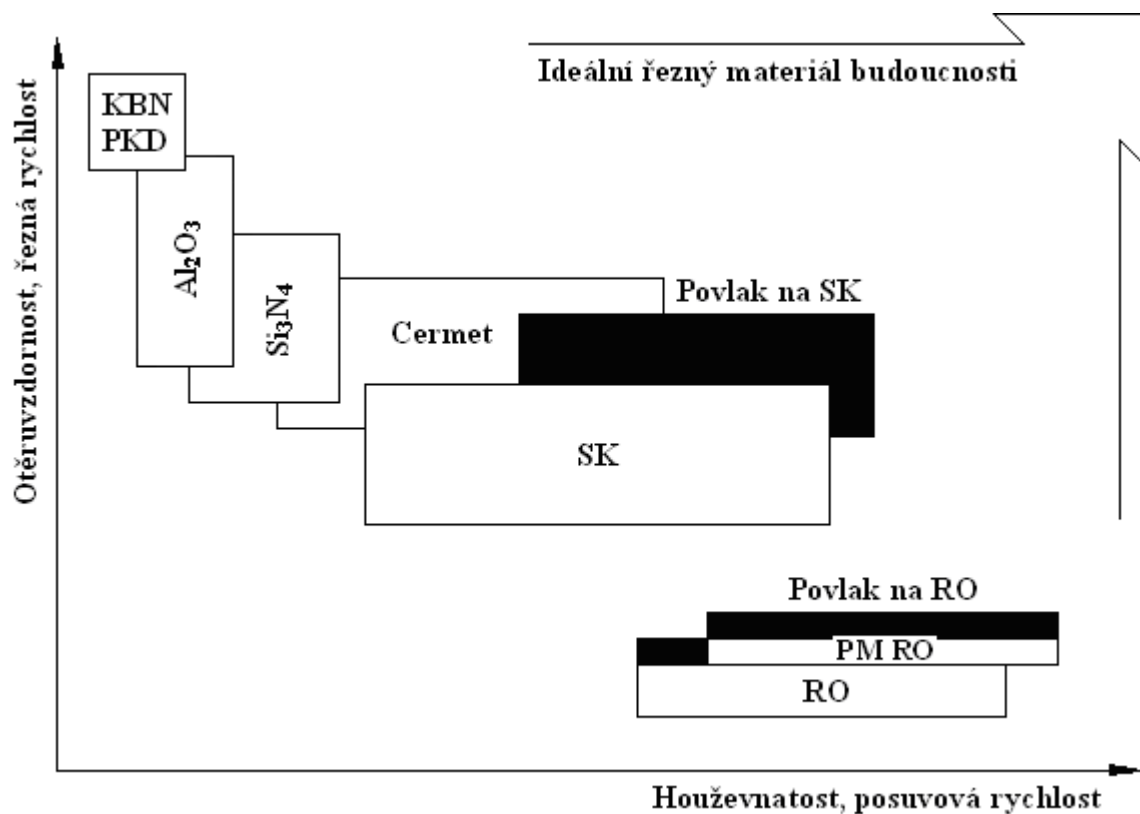
V závěru je účelné zmínit, že tento typ frézovacího nástroje se hodí především pro přesné dokončování tvarově složitých ploch, zejména v oblasti výroby forem.

2.2 Řezné materiály frézovacích nástrojů

Určení správného řezného materiálu je důležitým aspektem z ekonomického pohledu na proces obrábění. Mezi podstatné činitele produktivity se řadí strojní čas a čas nutný na výměnu otupeného nástroje. V současné době není ani jeden řezný materiál schopen zajistit komplexní požadavek obrábění (Obr. 11). Existují moderní možnosti materiálů, které zaujímají dosti širokou oblast aplikace.

Ideální řezný materiál by měl splňovat následující vlastnosti dle [9]:

- Dostatečnou tvrdost a odolnost proti opotřebení a plastické deformaci břitu.
- Vysokou houževnatost, tj. odolnost proti vylomení a vyštípnutí břitu.
- Chemicky neutrální chování vůči obráběným materiálům.
- Chemickou stabilitu a odolnost proti oxidačnímu a difuznímu opotřebení.
- Odolnost proti teplotnímu rázu.
- Schopnost neztrácet tvrdost a chemickou stálost při vysokých teplotách.



Obr. 11: Oblasti používaných řezných materiálů pro frézovací nástroje

3 Geometrie kulových frézovacích nástrojů

Geometrie řezného nástroje se významným způsobem podílí na velikosti složek síly řezání, na chvění systému SNO, na utváření a odvodu třísky z místa řezu. Tím má vliv i na jakost obrobeného povrchu a trvanlivost samotného nástroje. V případě pochopení a správného dodržení parametrů geometrie lze dosáhnout velice kvalitních a optimálních výsledků při procesu obrábění.

Nástrojové i geometrické parametry jsou charakterizovány pomocí úhlů, které jsou definovány v příslušných rovinách, přičemž orientace úhlů a volba rovin musí splňovat následující vlastnosti dle [9]:

- Definovatelnost.
- Jednoznačnost pro všechny nástroje.
- Aplikovatelnost při konstrukci, výpočtu, výrobě, kontrole i ostření.

Zavedení a značení geometrie nástroje je mezinárodně sjednocenou normou ISO 3002/1 – 1982, ze které vychází i norma ČSN ISO 3002-1 (22 0011) řezné nástroje.

3.1 Souřadnicové soustavy a roviny v nich

Jakýkoliv obráběcí nástroj lze pozorovat ze dvou hledisek. První hledisko definuje nástroj jako geometrické těleso a z druhého pohledu je definován jako pracovní nástroj, s nímž se realizuje proces obrábění. Proto se i řezná geometrie daného nástroje stanovuje ve dvou soustavách. Pro jednoznačnou identifikaci úhlů řezné části slouží nástrojová souřadnicová soustava (statická). Uplatní se zejména při konstrukci, výrobě, kontrole a ostření nástroje [10]. Tato soustava vychází z předpokládaného směru hlavního řezného pohybu a z předpokládaného směru posuvu. Pro určení geometrie nástroje během řezného procesu slouží pracovní souřadnicová soustava (kinematická). Tuto soustavu lze také nazvat jako efektivní. Identifikuje se zde geometrie v procesu řezání [10]. Tato soustava vychází ze směru výsledného řezného pohybu. V textu pracovní souřadnicovou soustavu označujeme indexem *e*. V mnoha případech je možno pracovat pouze se soustavou statickou, jelikož rozdíl mezi těmito dvěma soustavami se zanedbává.

V kontextu s geometrií řezného nástroje se občas mluví o třetí soustavě – soustavě obráběcího stroje, která určuje geometrii nástroje vzhledem k obráběcímu stroji. Vztah mezi nástrojovou soustavou a soustavou obráběcího stroje určuje nastavení nástroje na stroji [9]. Poloha mezi pracovní soustavou a soustavou obráběcího stroje je určena pohybem nástroje vůči obrobku.

Pro stanovení geometrie je třeba umístit do určeného bodu na ostří souřadnicové soustavy a roviny v nich. Jedná se o tzv. uvažovaný bod ostří, ve kterém chceme zjistit geometrii.

Nástrojová souřadnicová soustava spolu s rovinami je zobrazena na (Obr. 12).

Nástrojová rovina základní (P_r) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří a je kolmá na vektor rychlosti předpokládaného hlavního řezného pohybu.

Nástrojová rovina boční (P_f) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří v předpokládaném směru vektoru posuvového pohybu v_f a je kolmá na rovinu základní P_r .

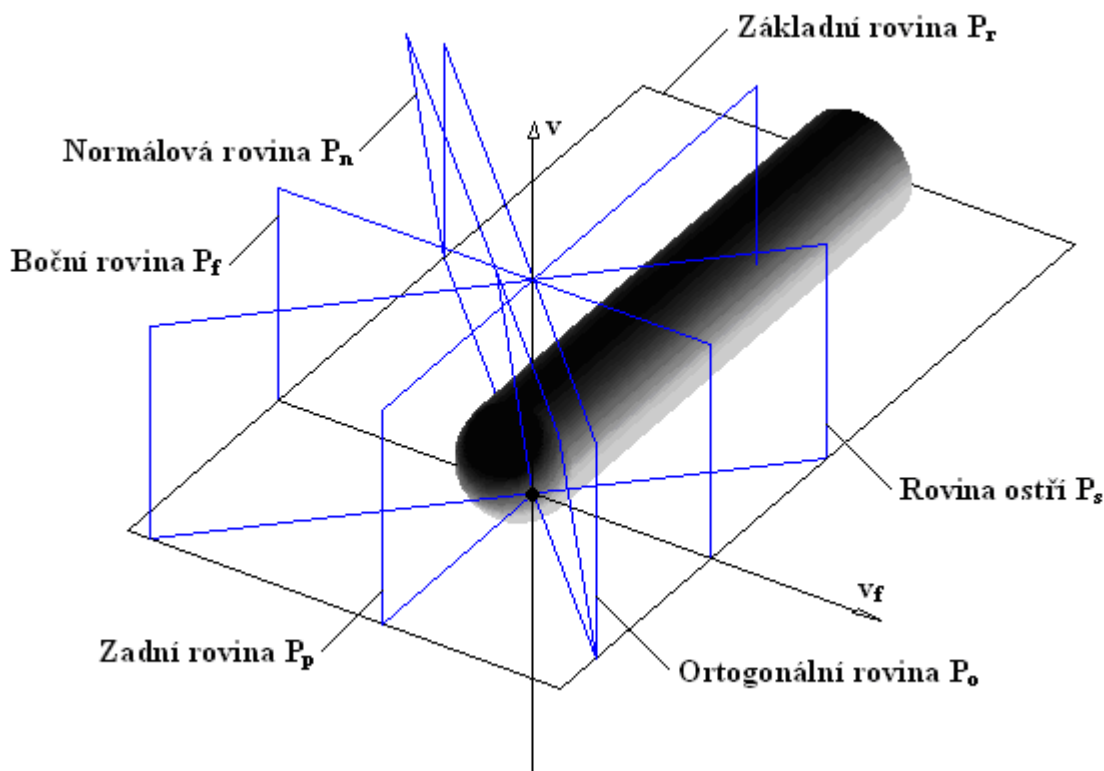
Nástrojová rovina zadní (P_p) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, která je kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a na nástrojovou rovinu boční P_f .

Nástrojová rovina ostří (P_s) je rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří a kolmá na nástrojovou základní rovinu P_r .

Nástrojová rovina ortogonální (P_o) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na nástrojovou rovinu základní P_r a nástrojovou rovinu ostří P_s .

Nástrojová rovina normálová (P_n) je rovina kolmá na hlavní ostří v uvažovaném bodě ostří. Rovina není obecně kolmá na rovinu základní P_r (pouze je-li úhel sklonu ostří $\lambda_s = 0$).

U kulového typu frézovacího nástroje, kde nástroj pracuje s posuvem kolmým na osu, je rovina boční P_f kolmá na osu nástroje a zadní rovina P_p je s osou nástroje rovnoběžná.



Obr. 12: Nástrojová souřadnicová soustava kulového nástroje

Pracovní souřadnicová soustava spolu s rovinami je zobrazena na (Obr. 13).

Pracovní rovina základní (P_{re}) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří a je kolmá na vektor rychlosti předpokládaného hlavního řezného pohybu.

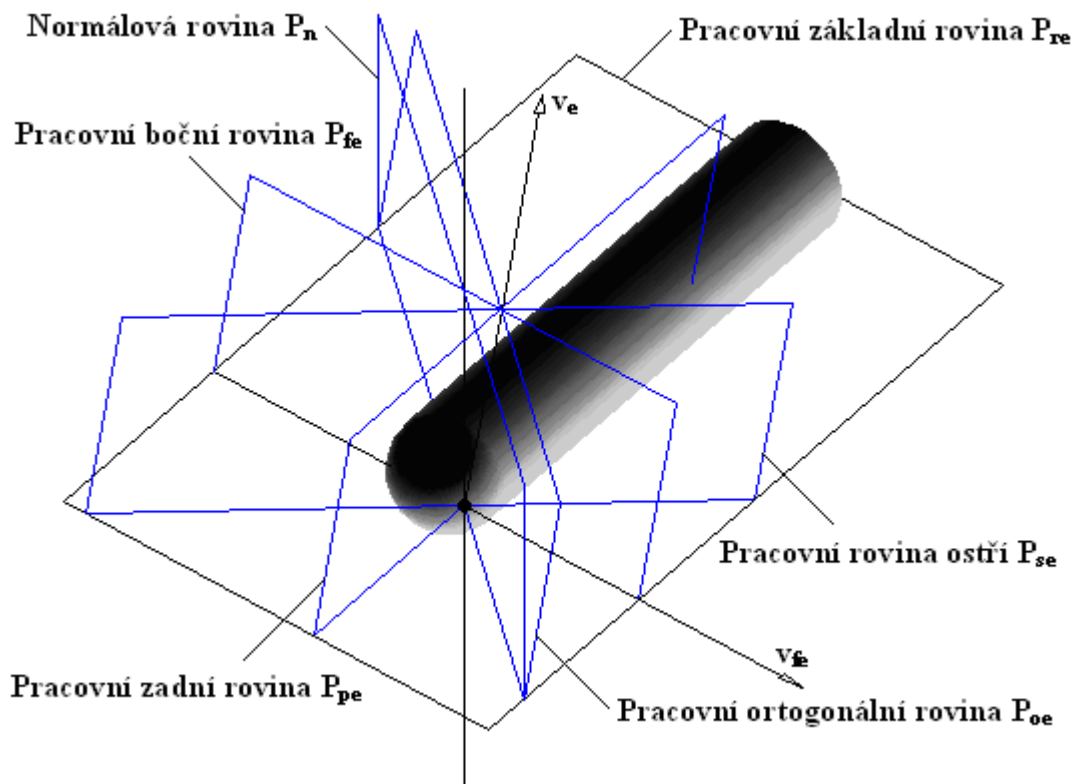
Pracovní rovina boční (P_{fe}) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří ve směru vektoru posuvového pohybu v_{fe} a je kolmá na pracovní rovinu základní P_{re} .

Pracovní rovina zadní (P_{pe}) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, která je kolmá na pracovní rovinu základní P_{re} a na pracovní rovinu boční P_{fe} .

Pracovní rovina ostří (P_{se}) je rovina tečná k ostří v uvažovaném bodě ostří a kolmá na pracovní základní rovinu P_{re} .

Pracovní rovina ortogonální (P_{oe}) je rovina procházející uvažovaným bodem ostří, kolmá na pracovní rovinu základní P_{re} a pracovní rovinu ostří P_{se} .

Pracovní rovina normálová (P_{ne}) je rovina kolmá na hlavní ostří v uvažovaném bodě ostří. Tato rovina je totožná s nástrojovou rovinou normálovou P_n .



Obr. 13: Pracovní souřadnicová soustava kulového nástroje

V případě frézování pomocí kulového nástroje je velice problematické stanovit či řešit pracovní souřadnicovou soustavu např. při 5-ti osém obrábění tvarové dutiny, kde nástroj mění polohu vůči povrchu obrobku (naklápěním vřetena, stolu apod.) ve zlomcích sekund.

3.2 Nástrojové a pracovní úhly řezné geometrie

U řezné geometrie se úhly stanovují pomocí rovin v jednotlivých souřadnicových soustavách a slouží k identifikaci geometrického umístění. Pro nástrojovou a pracovní souřadnicovou soustavu jsou definice zcela podobné. Označení se provádí spolu s přidáním indexu, ve které rovině je úhel naměřen. Rozdělení nástrojových a pracovních úhlů řezné geometrie do skupin je následující:

- Nástrojové a pracovní úhly umístění ostří.
- Nástrojové a pracovní úhly čela, hřbetu, břitu a řezu.
- Úhel sklonu ostří λ_s .

Úhly řezné geometrie mají schopnost ovlivňovat např. velikost jednotlivých sil řezání, utváření a odvod třísky, teplotu řezání, strukturu obráběného povrchu a v neposlední řadě také hospodárnost při obrábění.

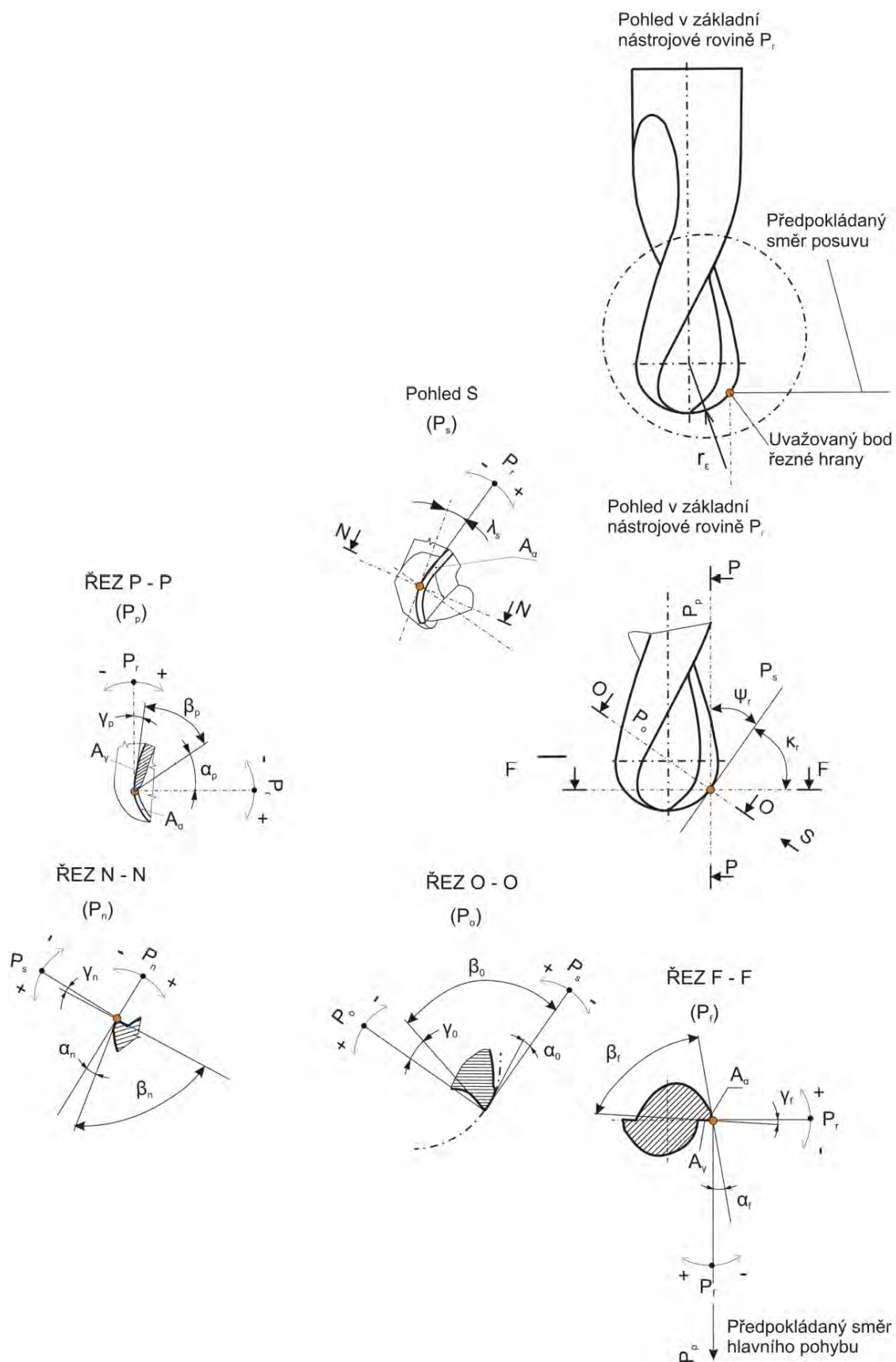
U nástrojů s kulovým ostřím je poměrně složité definovat pro různé body ostří orientaci soustav a tím i velikost nástrojových úhlů. Jelikož se v každém uvažovaném bodě na ostří mění orientace souřadnicových soustav a tím také právě i velikost úhlů.

Z teoretického pohledu a grafického rozboru na danou problematiku řezné geometrie lze stanovit několik zajímavých závěrů dle [10]:

- Je-li úhel $\lambda_s = 0$, pak se nástrojová rovina ortogonální P_o ztotožní s nástrojovou rovinou normálovou P_n .
- Je-li úhel $\lambda_s = 0$ a kterýkoliv z úhlů čela roven nule, pak i všechny ostatní úhly čela budou rovny nule.
- Je-li úhel $\lambda_s = 0$ a kterýkoliv z úhlů čela kladný resp. záporný, pak i všechny ostatní úhly čela budou kladné resp. záporné.
- Je-li úhel $\kappa_r = 90^\circ$, pak se nástrojová rovina ortogonální P_o ztotožní s nástrojovou rovinou boční P_f a nástrojová rovina ostří P_s s nástrojovou rovinou zadní P_p . Z toho vyplývá, že $\lambda_s = \gamma_p$, $\gamma_o = \gamma_f$ a $\alpha_o = \alpha_f$.
- Je-li úhel $\kappa_r = 0^\circ$, pak se nástrojová rovina ortogonální P_o ztotožní s nástrojovou rovinou zadní P_p a nástrojová rovina ostří P_s s nástrojovou rovinou boční P_f . Z toho vyplývá, že $\lambda_s = \gamma_f$, $\gamma_o = \gamma_p$ a $\alpha_o = \alpha_p$.

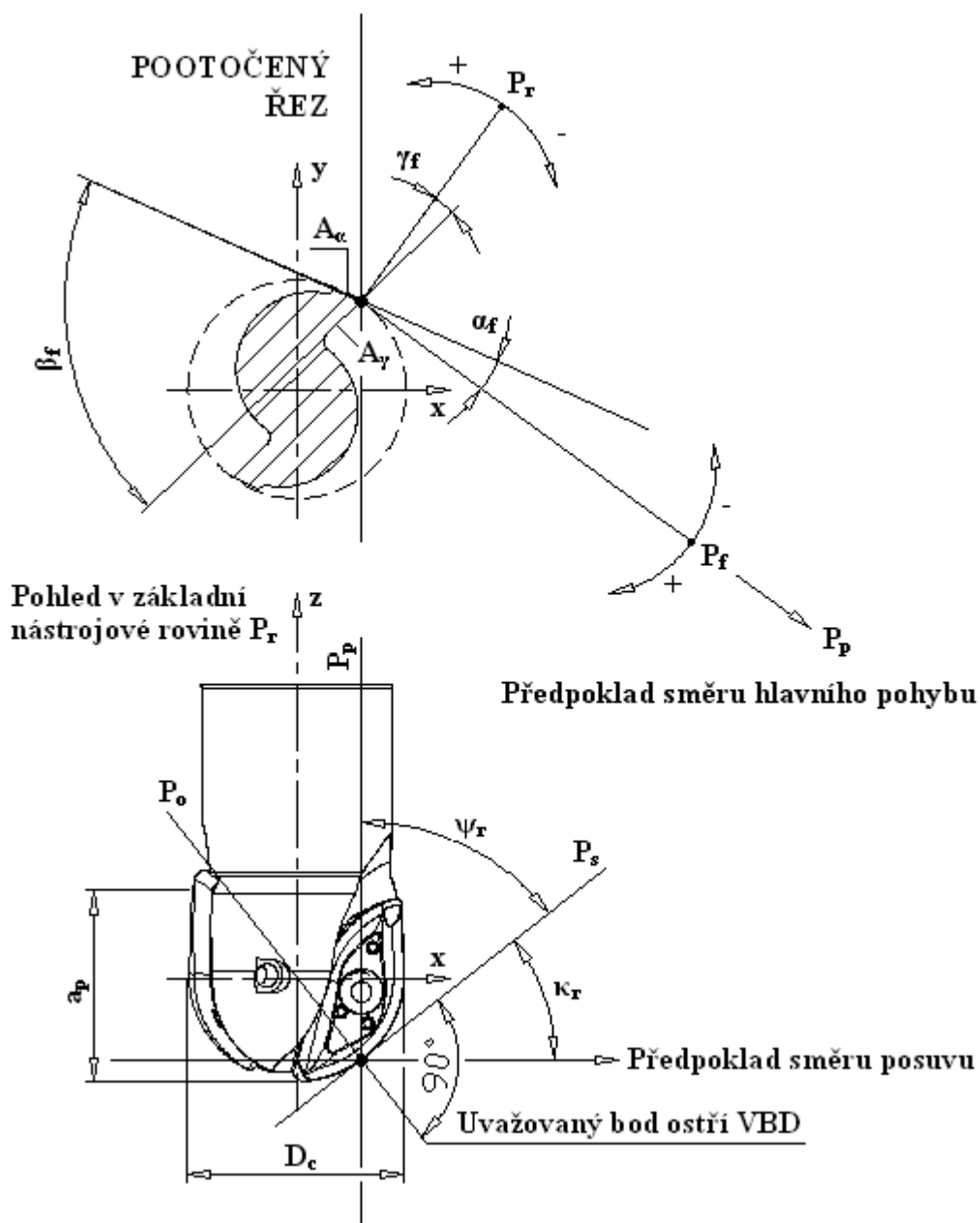
V následující kapitole 3.3 je uvedeno podrobné rozkreslení všech nástrojových úhlů a rovin řezné geometrie nástroje, které jsou definované v nástrojové souřadnicové soustavě.

3.3 Geometrie monolitního frézovacího nástroje



Obr. 14: Geometrie monolitního kulového frézovacího nástroje [11]

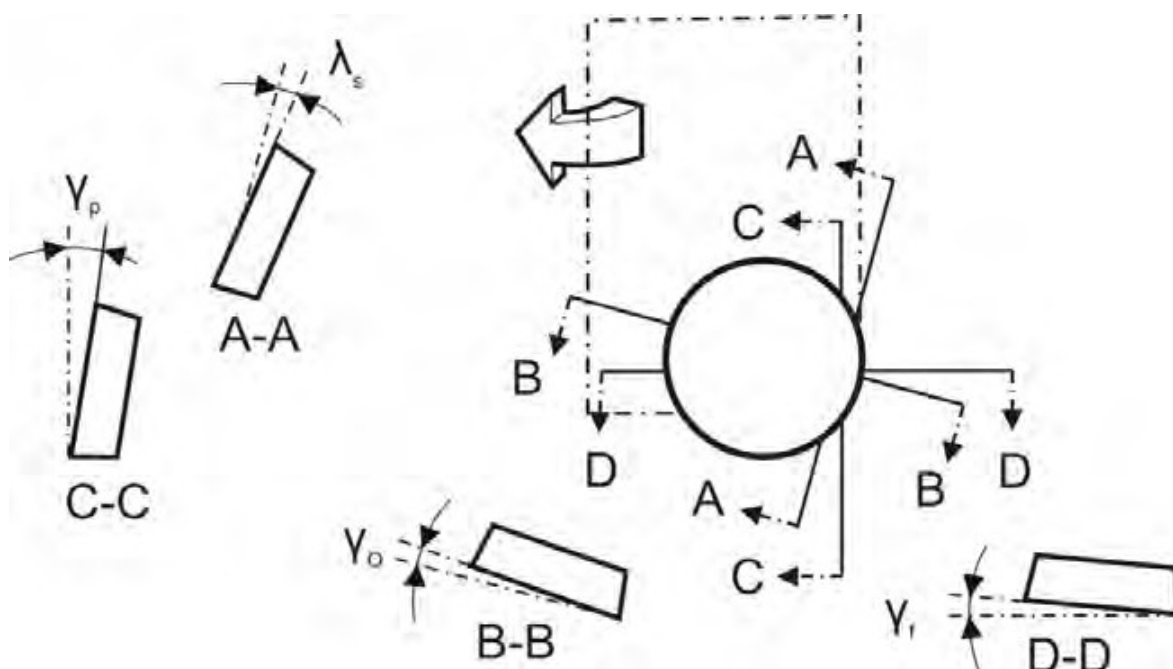
3.4 Geometrie frézovacího nástroje s VBD



Obr. 15: Geometrie frézovacího nástroje s VBD speciálního tvaru „S“

Určení řezné geometrie frézovacího nástroje s VBD speciálního tvaru „S“ je uvedeno na obrázku (Obr. 15) a na (Obr. 16) je zobrazena geometrie VBD kruhového tvaru. Mezi tzv. funkční nebo-li pracovní úhly vyměnitelných břitových destiček se řadí úhel sklonu ostří λ_s a ortogonální úhel čela γ_o . Úhel sklonu ostří λ_s a rovněž úhel nastavení hlavního ostří κ_r mají schopnost ovlivnit zejména způsob vnikání hlavního ostří do materiálu obrobku a také směr odchodu třísek. Ortogonální úhel čela γ_o nebo-li efektivní úhel čela

má schopnost zásadně ovlivnit sílu řezání (velikost složek) a tím i výkon stroje. Vzhledem k pozitivnímu úhlu čela snižuje spotřebu energie a nástroj má delší životnost. Nástroje s VBD speciálního tvaru „S“ nabízí uživateli rozsah tohoto úhlu mezi 8° až 12° . Mezi nástrojové či konstrukční úhly vyměnitelných břitových destiček se řadí boční úhel čela γ_f (radiální úhel čela) a zadní úhel čela γ_p (axiální úhel čela). V případě VBD speciálního tvaru „S“ může být velikost těchto úhlů v obou případech nulová. Existuje mnoho dalších pracovních a konstrukčních úhlů, které lze přesně definovat normou ČSN ISO 3002/1.



Obr. 16: Geometrie vyměnitelných břitových destiček kruhového tvaru [1]

3.5 Stanovení geometrických parametrů břitu

Volba správné geometrie nástroje je velice složitou záležitostí, a proto je nutné věnovat této problematice maximální pozornost, jelikož může zřetelně ovlivnit dle [9]:

- Pevnost břitu, ev. zubu.
- Maximální trvanlivost nástroje.
- Spotřebu energie a vhodný poměr velikosti složek řezné síly.
- Stabilitu procesu řezání.
- Požadavky kladené na přesnost rozměrů a jakost obrobené plochy.

Jednotlivé geometrické parametry ovlivňují obráběcí proces především takto dle [9]:

κ_r – určuje hloubku odřezávané vrstvy a délku ostří v záběru, závisí na něm i poměr složek řezné síly v základní rovině, ovlivňuje i tuhost špičky nástroje, její opotřebení, v neposlední řadě i drsnost povrchu obrobku.

λ_s – ovlivňuje především směr odchodu třísky z místa řezu a tuhost špičky nástroje, má vliv na plynulost řezu - dynamické poměry při vřezávání.

γ_o – ovlivňuje utváření třísek, velikost složek řezné síly, opotřebení nástroje, spolu s úhlem hřbetu i tuhost a pevnost břitu.

α_o – ovlivňuje poměry tření nástroje o obrobek, tvorbu tepla, poměry složek řezné síly a trvanlivost nástroje.

V případě úhlu nastavení hlavního ostří κ_r se u těchto nástrojů jedná o úhel, který se mění od 0° do 45° v závislosti na hloubce řezu a_p a průměru nástroje D_c . Při vstupu břitu nástroje do obrobku se úhel nastavení hlavního ostří mění (postupně narůstá), což zaručuje velmi klidný průběh řezání. Řezné nástroje tohoto tvaru mají vysokou stabilitu břitu.

Navrhnout či stanovit ideální řeznou geometrii nástroje není možné. V každém případě se vychází z určitého kompromisu, kde na jedné straně máme potřebu snadného a hospodárně efektivního obrábění, na druhé straně je to pak potřeba dokonalé tuhosti, trvanlivosti a výkonu nástroje.

4 Změna geometrie kulových fréz při náklonu

V této kapitole je účelné říci, že nástrojovou geometrii řezného nástroje zásadně neovlivníme při procesu obrábění. Řezný nástroj dostává svoji nástrojovou geometrii při návrhu či konstrukci a výrobě nástroje. V této fázi lze efektivním způsobem dosáhnout změny geometrie nástroje při procesu frézování změnou pracovní souřadnicové soustavy. Při změně pracovní geometrie nástroje vůči obrobku dochází k výraznému napomáhání k dosažení lepší jakosti obrobku a to zejména v jeho drsnosti.

4.1 Definování pracovní geometrie břitu

Pracovní geometrie neboli skutečná geometrie nástroje v procesu řezání se pokaždé jistým způsobem liší od nástrojové geometrie. Na změnu nástrojové geometrie v pracovní mají vliv především dle [9]:

- Jiný směr vektoru hlavního pohybu v a vektoru posuvu v_f oproti předpokladu.
- Velikost rychlosti posuvu v_f vzhledem k rychlosti hlavního pohybu v .
- Natočení nástroje do tzv. pracovní polohy.

Změna směru vektoru posuvu v_f se objevuje právě u kopírovacích nástrojů, kde se jednoznačně bude lišit směr posuvu od předpokládaného směru z důvodu dodržení tvaru obráběné součásti. Z tohoto důvodu se liší i pracovní geometrie od nástrojové geometrie.

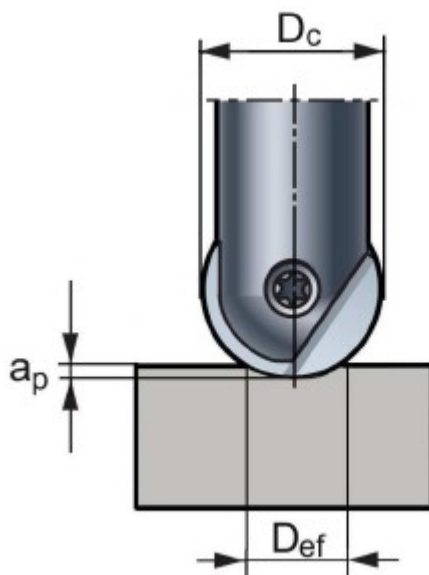
Velice důležitá změna geometrických parametrů nastává při přechodu od nástrojové k pracovní soustavě. V tomto případě se rozumí změna odlišného způsobu nastavení nástroje v pracovní poloze jako je např. vyklonění nástroje. Právě tento způsob vyklonění či natočení do tzv. technologické polohy je třeba aplikovat u nástrojů, které disponují takovou nástrojovou geometrií, že nejsou schopni efektivního obrábění.

Během životnosti nástroje není vyloučeno, že může dojít ke změně geometrie nástroje vlivem odostřování (úhel čela a hřbetu). V praxi dochází často ke kombinaci těchto změn geometrických parametrů.

4.2 Frézování s využitím náklonu nástroje

Při frézování kulovými frézami standardním způsobem, kdy materiál a nástroj svírají pravý úhel, je na kulovém ostří v ose frézy nulová řezná rychlost. V tomto místě nástroj pouze zatlačuje materiál obrobku. Díky tomu zde dochází k nežádoucím vlivům, jako je pěchování třísky, zvyšování teploty řezání, zvyšování chvění nebo zvýšená tvorba nárůstku. Tyto jevy mají za následek zhoršení jakosti povrchu obráběného materiálu a snížení trvanlivosti nástroje, v nejhorším případě jeho vyštípnutí. To lze eliminovat naklopením nástroje nebo nakloněním obrobku. [12]

(Obr. 17) znázorňuje umístění nástroje u tříosého obráběcího centra, které nedisponuje nakloněním vřetene reprezentuje úhel $\beta_{n(f)} = 0^\circ$. Při obrábění menších tlouštěk řezu především pak u dokončování zde dochází k podstatnému snížení efektivní řezné rychlosti a také efektivního průměru nástroje D_{ef} .



Obr. 17: Efektivní průměr nástroje bez náklonu [13]

Výpočet efektivního řezného průměru nástroje bez naklopení:

$$D_{ef} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (D_c - a_p)} \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

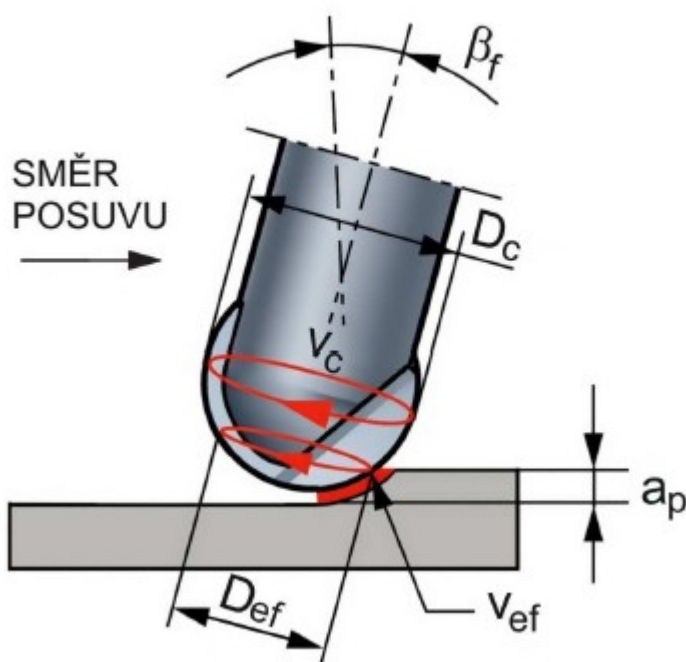
kde: a_p – je hloubka řezu [mm]

D_c – průměr nástroje [mm]

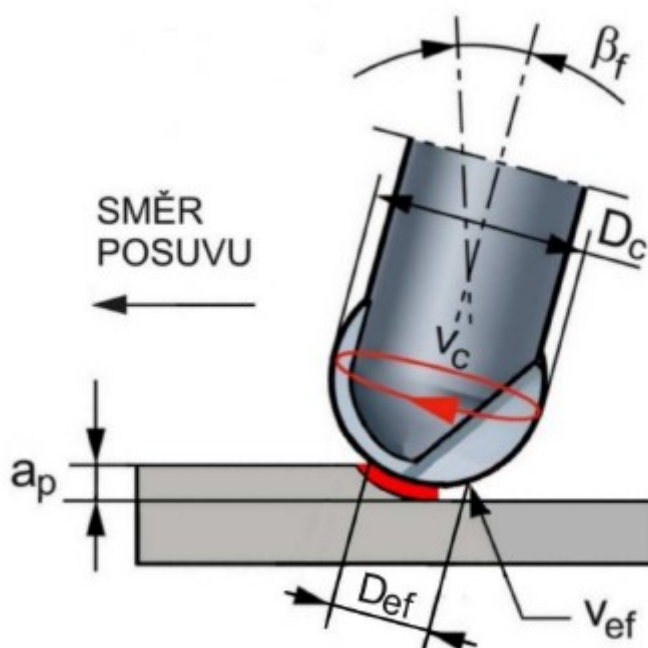
V případě odklonu nástroje vzhledem k normále povrchu ve směru posuvu dojde ke vzniku mírného normálového napětí. Tento boční příklon nástroje k dosud neobrobenému povrchu při řádkování přináší útlum samobuzených kmitů a zvýšení produktivity obrábění až o 2/3 původních hodnot [14]. Z tohoto důvodu má sklon nástroje stabilizující účinnost zásluhou efektivního tlumení samobuzeného kmitání a svojí příznivou směrovou orientací. V takovém případě se v nástroji objevují ve větší míře tahové síly a při náhodném zvýšení sil řezání dojde k odklonu nástroje od obráběného materiálu. Vliv sklonu nástroje je zde rozhodující, jelikož je v něm při malém poloměru soustředěna téměř veškerá prostorová poddajnost řetězce „toku síly“ od nástroje k obrobku [14].

Úhel naklonění nástroje od normálové osy k povrchu obrobku se používá v rozmezí 10° až 30° . Optimální úhel naklonění nástroje nelze stanovit zcela přesně, i když literatura [15] uvádí hodnoty optimálního úhlu okolo 15° . V literatuře [14] je tato hodnota okolo 20° . Dle experimentů lze také říct, že jeden z rozhodujících faktorů je průměr nástroje. [2]

Velmi důležitým aspektem je rovněž směr posuvu nástroje. První způsob posuvu nástroje lze definovat jako tažený (Obr. 18). Tento způsob posuvu nástroje se projevuje zejména v oblasti kvality povrchu obráběného materiálu a v tišším chodu nástroje a tím se významným způsobem podílí na zefektivnění celého procesu řezání. Ve druhém způsobu posuvu nástroje je nástroj naopak tlačенý, kde v mnoha případech závisí na hloubce řezu a_p . Zde naopak nedochází ke zkvalitnění povrchu a to z toho důvodu, že v oblasti řezu se vyskytuje nulová řezná rychlost. Tím pádem nedochází ani ke zvýšení efektivní řezné rychlosti, resp. efektivního průměru nástroje (Obr. 19). Je třeba říct, že u tlačенého nástroje při náklonu je menší efektivní řezný průměr nástroje než při použité metodě bez využití náklonu a navíc je tu potenciál vzniku vnitřních pnutí. Toto se odrazí negativně v procesu obrábění, resp. ve zhoršených řezných podmínkách. Z toho důvodu je třeba při náklonu nástroje dodržet polohu nástroje ve směru taženém. Zásadní vliv na kvalitu povrchu a životnost nástroje má také způsob použití sousledného či nesousledného frézování.



Obr. 18: Tažený nástroj při naklonění kulového nástroje [13]



Obr. 19: Tlačený nástroj při naklonění kulového nástroje [13]

Tato metoda obrábění lze aplikovat na tří a víceosých obráběcích centrech a to za předpokladu, že při využití tříosých obráběcích center bude potenciál naklonění čtvrté osy. Kromě toho lze realizovat naklonění nástroje ve směru kolmém na posuv nástroje, kde se úhel náklonu značí jako β_n . Níže uvedené vztahy ovšem platí pro oba náklony.

Pro stanovení velikosti efektivního řezného průměru nástroje lze využít následující matematické vztahy:

Pro obrábění taženým nástrojem nakloněným ve směru posuvu

$$D_{ef} = D_c \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{D_c - 2 \cdot a_p}{D_c} \right) + \beta_f \right] \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

Pro obrábění tlačeným nástrojem nakloněným proti směru posuvu

$$D_{ef} = D_c \cdot \sin \left[\arccos \left(\frac{D_c - 2 \cdot a_p}{D_c} \right) - \beta_f \right] \quad [\text{mm}] \quad (4.3)$$

kde pro oba případy platí: a_p – hloubka řezu [mm]
 D_c – průměr nástroje [mm]
 β_f – úhel náklonu nástroje [°]

Efektivní řeznou rychlost vypočteme dle upraveného prostého vztahu:

$$v_{ef} = \frac{\pi \cdot D_{ef} \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.4)$$

kde: n – jsou otáčky nástroje [min^{-1}]
 D_{ef} – efektivní průměr nástroje [mm]

Dle uvedených vztahů lze konstatovat, že při daných řezných podmínkách se efektivní průměr frézy zvětšuje v závislosti na zvětšujícím se náklonu nástroje, tzn. vzniká zde přímá úměra. Stejná situace vzniká i při závislosti efektivní řezné rychlosti na náklonu nástroje.

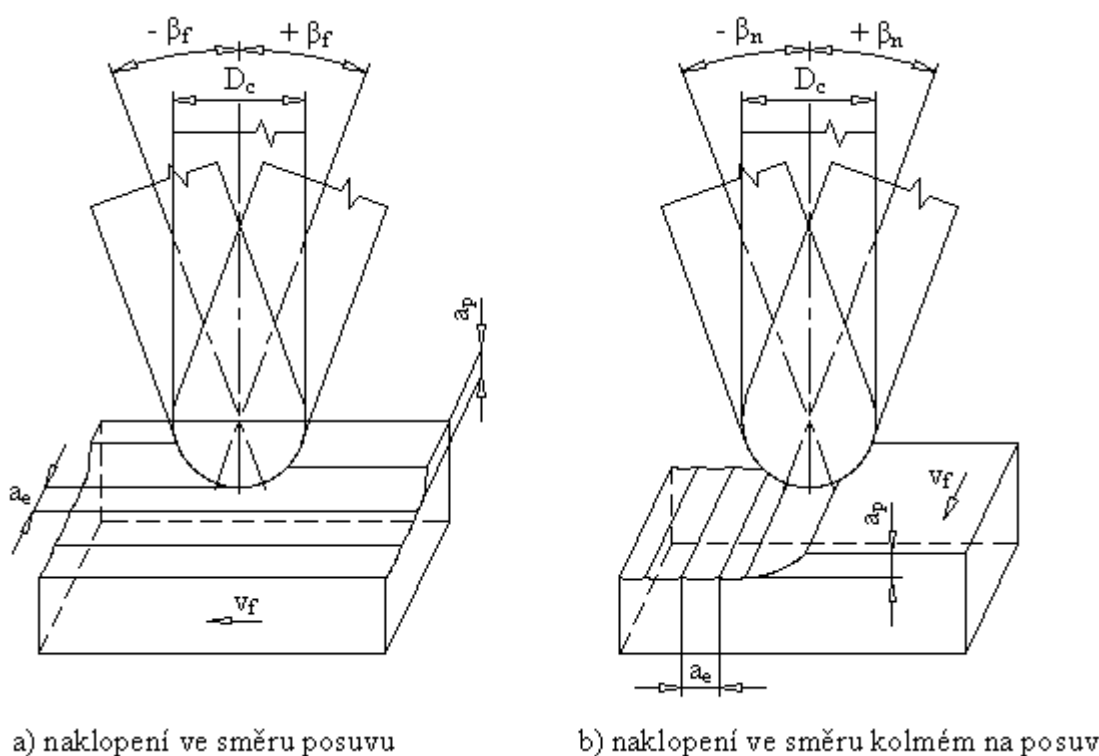
4.3 Strategie frézování naklopeným nástrojem

Při frézování tvarů jako jsou komplikované tvarové plochy dochází k vzájemnému navazování jednotlivých elementů základních tvarů součásti. Pro dosažení stabilního postavení nástroje, resp. úhlu naklopení nástroje od kolmice k obráběnému povrchu je potřeba v jistých případech použít víceosého frézování. V těchto případech je nedostačující i obrábění ve třech osách současně, kde čtvrtá osa má tzv. indexované naklopení.

Mezi důležitou část víceosého obrábění se řadí strategie řízení náklonu osy nástroje, jako např. definovaný prostorový vektor; předklon ve směru pohybu a boční výklon, jeden z úhlů může být variabilní v definovaném rozsahu; osa procházející bodem; osa procházející přímkou; interpolace mezi definovanými vektory; 4osá strategie, kde jedna osa je blokována. Je zde optimalizovaný úhel v závislosti na křivosti plochy - adaptivní náklon dovoluje maximální úběr materiálu, zvýšení jakosti povrchu a redukci obráběcího času. [16]

V případě nutnosti je možnost o doplnění úhlových NC os A a B provedením natočení vřeteníku, natočení obrobku nebo i rozdělení natočení mezi vřeteník a obrobek. U rozměrově a tvarově složitých obrobků se aplikuje dvouosé natáčení vřeteníku z důvodu problematického umístění na otočném a sklopném stole. Speciální případ tvoří HSC aplikace, kde není možné přivádět pohyb k vřetenu přes naklápěcí kuželové převody, ale je nutné využít naklápění integrovaného vřetena jako celku. Zde se upřednostňuje použití dvouosého natáčení obrobku upnutého na otočném stole. A to z důvodu gyroskopického efektu při roztáčení HSC vřeten a požadavku na efektivní odstranění třísek z místa řezu. Velmi se rozšiřuje koncepce otočného stolu uloženého ve sklopné „kolébce“, která je využitelná v kombinaci s vertikálním i horizontálním vřetenem [17].

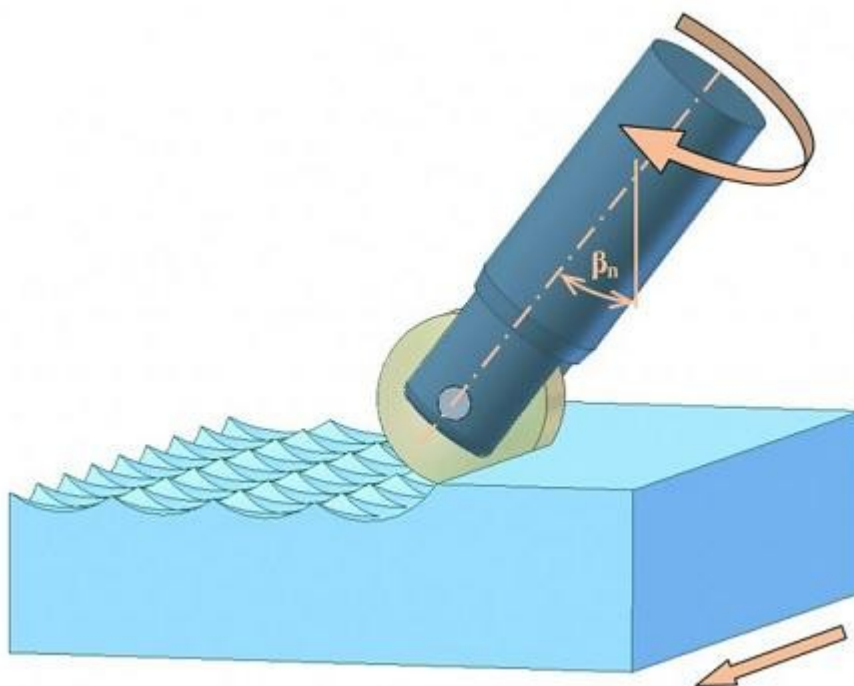
Následující obrázek (Obr. 20) zobrazuje možnosti naklopení nástroje vůči normále k povrchu obrobku při obrábění kulovou frézou.



Obr. 20: Možnosti frézování naklopeným nástrojem (a) naklopení ve směru posuvu, b) naklopení kolmé na směr posuvu [16] - upraveno

4.4 Závislost náklonu nástroje na drsnost povrchu

Pro dosažení výrazně lepší drsnosti povrchu při frézování tvarových ploch lze provést náklonem nástroje vůči normále k povrchu (Obr. 21). V průběhu frézování dochází ke tvorbě stop na obrobeném povrchu po jednotlivých řezných klínech nástroje. Problematiku mikrogeometrie povrchu při procesu řezání ovlivňuje kinematika, konstrukce nástroje a v neposlední řadě podmínky utváření třísky na jednotlivých řezných klínech. U třískového obrábění se mikrogeometrie určuje podle velikosti podélné a příčné drsnosti povrchu. Z teoretického hlediska lze říci, že podélná drsnost povrchu je tvořena kopírováním drsnosti břitu a z praktického hlediska je tvořena otěrem hřbetu nástroje o obráběnou plochu se vznikem nárůstku. Vznik příčné drsnosti zapříčiní aplikace kopírování zaobleného břitu řezného nástroje vůči obrobenému povrchu s jistou plastickou deformací a opotřebování poloměru zaoblení nástroje. Při procesu obrábění dochází k ovlivnění drsnosti povrchu mnoha činiteli.



Obr. 21: Poloha nástroje vůči obrobku při náklonu o úhel β_n [18]

Náklonem nástroje lze zlepšit příčnou i podélnou drsnost povrchu a nepatrně snížit i čas obrábění. Drsnost povrchu lze do jisté míry ovlivnit vhodnou šířkou řezu a posuvem na zub. Svoji roli hraje i efektivní průměr nástroje, kombinace sousledného a nesousledného frézování či způsob posuvu nástroje. Pokud při frézování dochází k vytrhávání povrchu - tzv. chlupatění je třeba toto eliminovat použitím procesních kapalin.

4.5 Metodika hodnocení náklonu na změnu geometrie nástroje

Tato část práce se zaměřuje na porovnání a vyhodnocení vybraných nástrojů z hlediska náklonu a dalších faktorů na změnu geometrie nástroje při procesu obrábění. Pro vzájemné srovnání a zpracování získaných hodnot je třeba disponovat několika parametry od uvedených výrobců fréz. V následující tabulce (Tab. 1) jsou uvedeny jednotlivé vybrané nástroje pro závěrečné vyhodnocení.

Tab. 1: Nástrojová data od jednotlivých vybraných frézovacích nástrojů

Náhled	Výrobce nástroje	Označení nástroje	Průměr nástroje	TYP
			D _c [mm]	
	FETTE spol. s.r.o.	HSCline 1412C	8	Monolitní
	ISCAR ČR s.r.o.	MM EB100A07	10	VŘH
	Pramet Tools, s.r.o.	RC 10	10	VBD
	ISCAR ČR s.r.o.	CR D120-QF	12	VBD
	Pramet Tools, s.r.o.	RC 16	16	VBD
	EMUGE - FRANKEN, s.r.o.	HSC KP1-B	16	VBD

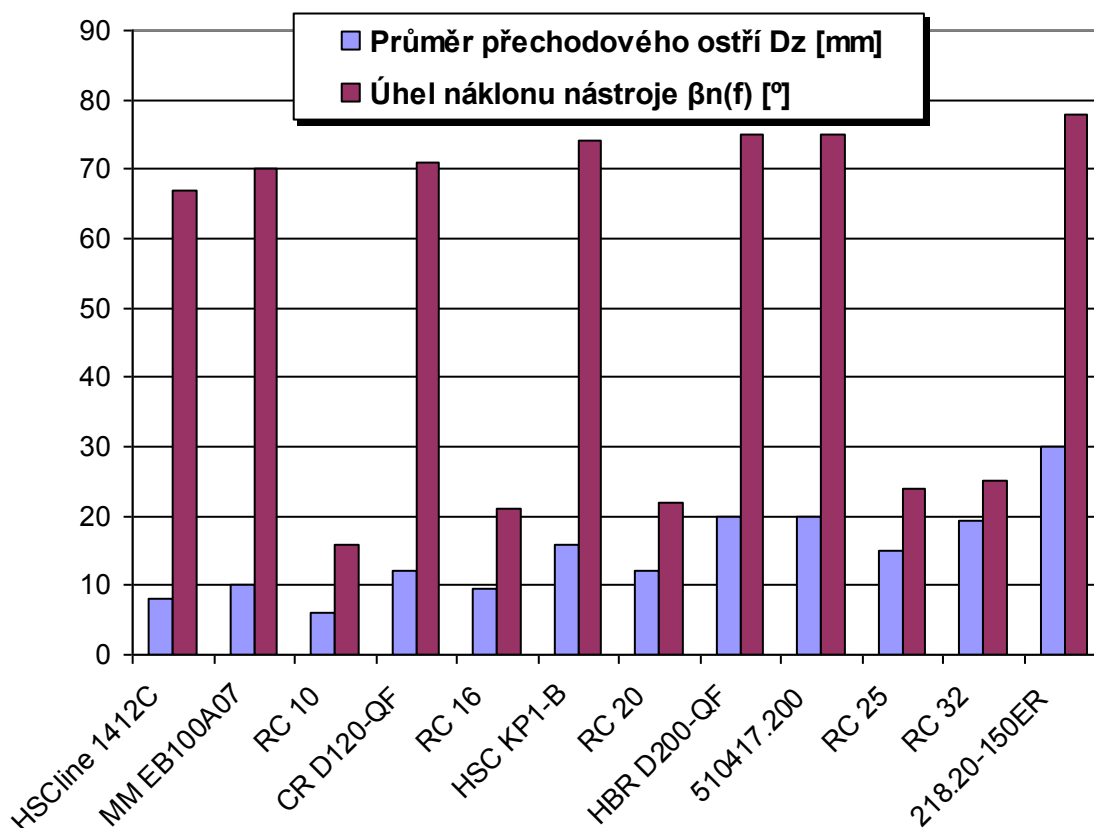
	Pramet Tools, s.r.o.	RC 20	20	VBD
	ISCAR ČR s.r.o.	HBR D200-QF	20	VBD
	ZPS-FN a.s.	510417.200	20	Monolitní
	Pramet Tools, s.r.o.	RC 25	25	VBD
	Pramet Tools, s.r.o.	RC 32	32	VBD
	Seco Tools CZ, s.r.o.	218.20-150ER	30	VBD

V následujících tabulkách (Tab. 2, 3, 4) uvádím maximální možné naklonění jednotlivých frézovacích nástrojů o úhel $\beta_{n(f)}$ s ohledem na průměr přechodového ostří nástroje D_z , při nichž ještě nedochází k záběru mimo fazetku VBD či břitu nástroje a to při $a_p = 0,3 \text{ mm}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $a_p = 1,6 \text{ mm}$. Jedná se o maximální náklon nástroje, kde je zachována geometrie VBD či břitu nástroje. V případě překročení maximálního náklonu dochází k řezání mimo přechodové ostří nástroje a tím se jeví především zvýšená drsnost povrchu. Tento problém může nastat při obrábění strmějších ploch, kde je úhel náklonu u jednotlivých typů nástrojů větší než je uvedeno v následujících tabulkách.

Tab. 2: Porovnání dosažených hodnot průměru přechodového ostří D_z a max. úhlu náklonu nástroje $\beta_{n(f)}$ pro jednotlivé frézovací nástroje při hloubce řezu $a_p = 0,3 \text{ mm}$

Označení nástroje	Průměr přechodového ostří	Úhel náklonu nástroje
	$D_z \text{ [mm]}$	$\beta_{n(f)} [^\circ]$
HSCline 1412C	8	67
MM EB100A07	10	70
RC 10	6	16
CR D120-QF	12	71
RC 16	9,6	21
HSC KP1-B	16	74
RC 20	12	22
HBR D200-QF	20	75
510417.200	20	75
RC 25	15	24
RC 32	19,2	25
218.20-150ER	30	78

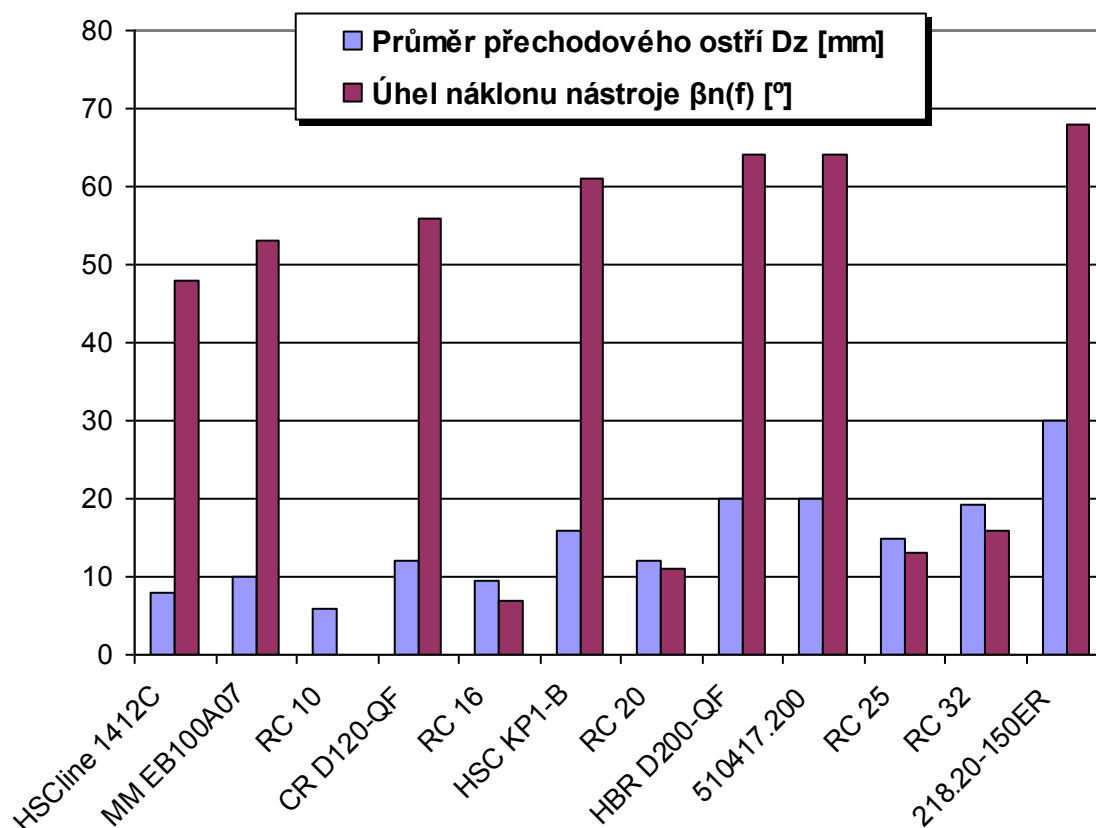
Graf 4.1: Grafické vyhodnocení dosažených hodnot průměru přechodového ostří D_z a max. úhlu náklonu nástroje $\beta_{n(f)}$ pro jednotlivé frézovací nástroje při hloubce řezu $a_p = 0,3 \text{ mm}$



Tab. 3: Porovnání dosažených hodnot průměru přechodového ostří D_z a max. úhlu náklonu nástroje $\beta_{n(f)}$ pro jednotlivé frézovací nástroje při hloubce řezu $a_p = 1 \text{ mm}$

Označení nástroje	Průměr přechodového ostří	Úhel náklonu nástroje
	$D_z \text{ [mm]}$	$\beta_{n(f)} [^\circ]$
HSCline 1412C	8	48
MM EB100A07	10	53
RC 10	6	0
CR D120-QF	12	56
RC 16	9,6	7
HSC KP1-B	16	61
RC 20	12	11
HBR D200-QF	20	64
510417.200	20	64
RC 25	15	13
RC 32	19,2	16
218.20-150ER	30	68

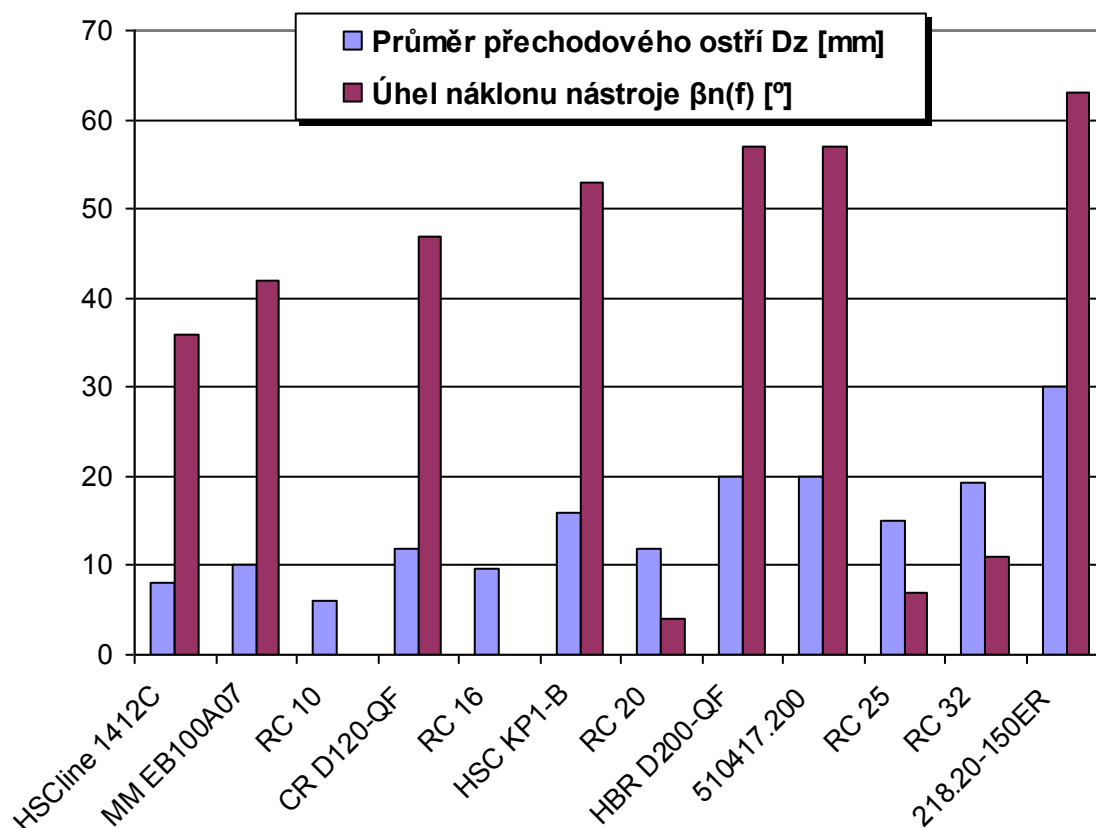
Graf 4.2: Grafické vyhodnocení dosažených hodnot průměru přechodového ostří D_z a max. úhlu náklonu nástroje $\beta_{n(f)}$ pro jednotlivé frézovací nástroje při hloubce řezu $a_p = 1 \text{ mm}$



Tab. 4: Porovnání dosažených hodnot průměru přechodového ostří D_z a max. úhlu náklonu nástroje $\beta_{n(f)}$ pro jednotlivé frézovací nástroje při hloubce řezu $a_p = 1,6 \text{ mm}$

Označení nástroje	Průměr přechodového ostří	Úhel náklonu nástroje
	$D_z \text{ [mm]}$	$\beta_{n(f)} \text{ [°]}$
HSCline 1412C	8	36
MM EB100A07	10	42
RC 10	6	-
CR D120-QF	12	47
RC 16	9,6	0
HSC KP1-B	16	53
RC 20	12	4
HBR D200-QF	20	57
510417.200	20	57
RC 25	15	7
RC 32	19,2	11
218.20-150ER	30	63

Graf 4.3: Grafické vyhodnocení dosažených hodnot průměru přechodového ostří D_z a max. úhlu náklonu nástroje $\beta_{n(f)}$ pro jednotlivé frézovací nástroje při hloubce řezu $a_p = 1,6 \text{ mm}$



V závěrečném hodnocení lze konstatovat, že vybrané nástroje od různých výrobců vykazují rozdílné možnosti v oblasti geometrie a použití max. náklonu nástroje. Měření nástrojů se provedlo pouze v omezeném a dostupném množství nástrojů, které ve větší části uvolnila Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB-TUO. Shrnutí je takové, že u jistých nástrojů je zachována velikost úhlů čela a hřbetu při náklonu, ale naopak existují potenciální nástroje se změnou geometrie při náklonu a tím k řezání mimo přechodové ostří nástroje. Z vybraných nástrojů se ve většině případů jedná o VBD a částečně monolitní nástroje a také jedna vyměnitelná řezná hlava. Uvedené proměřené a porovnané nástroje se používají z velké části pro lehké až středně-těžké pracovní podmínky a dokončovací až polodokončovací operace frézování.

Zjištěné maximální možné úhly naklopení u jednotlivých nástrojů jsou spíše orientační, není možné aplikovat běžně maximální náklon, jelikož toto je podmíněno především kvalitou drsnosti povrchu. Některé nástroje umožňují maximální náklon a také jejich průměr přechodového ostří je maximální, tzn. dochází k řezání až na obvodové ostří, kde nedochází k výrazným změnám nebo se geometrie zásadně nemění.

VBD typu RC společnosti Pramet Tools, s.r.o. mají přechodové ostří jiné oproti ostatním výrobcům zkoušených nástrojů. Toto lze jasně zpozorovat na jednotlivých grafech, jak dochází ke změně max. úhlů naklopení u jednotlivých nástrojů, a tak jsou vhodné pro náklon a disponují větším rozsahem úhlů potenciálního naklonění.

Mezi důležité činitele, které se zásadním způsobem uplatňují či ovlivňují změnu geometrie nástroje při náklonu, se řadí například:

- Velikost úhlu naklopení nástroje $\beta_{n(f)}$.
- Volba řezných podmínek (především hloubka řezu a_p).
- Provedení a typ frézovacího nástroje.
- Velikost průměru frézovacího nástroje.
- Nastavení a velikost úhlů řezné geometrie nástroje.
- Problematická - členitá tvarová plocha.
- Velikost a délka ostří nástroje.

Doporučuji výrobcům nástrojů, pokud je poptávka o diskuzi úprav utvařeče, tzn. provést změnu konstrukčního provedení nástroje. Ovšem tohle to doporučení není podloženo širším výzkumem.

5 Závěr

Cílem bakalářské práce se bylo zaměřit na problematiku frézování tvarových ploch pomocí kulového nástroje. V úvodu se práce ubírá na obecnou charakteristiku obrábění tvarových ploch za pomoci právě sférického nástroje, jakožto k nejvhodnějšímu nástroji pro obrábění tvarově složitých ploch. Dále pak k poloze nástroje vůči obráběnému povrchu, kde je velice důležité správné postavení nástroje vůči obráběné ploše, obzvláště pokud se jedná o 5-ti osé obrábění, kde dochází ke změně postavení nástroje ve zlomcích sekund. Tato část obsahuje i možnost aplikace HSC nebo-li vysokorychlostního obrábění právě u frézování tvarových ploch a možnost uplatnění 5-osého frézování při obrábění těchto ploch. Následuje představení a využití nástrojů pro tento způsob frézování spolu s uvedením nejpoužívanějších řezných materiálů na trhu.

V další části práce je obsažena část souřadnicových soustav, ve kterých se geometrie zjišťuje a dále pak úhly řezné geometrie, samotná geometrie podle typu nástroje a určování parametrů břitu. Poslední kapitola řeší změnu geometrie nástroje při náklonu s ohledem na pracovní geometrii břitu, strategie frézování při náklonu a závislost náklonu nástroje na drsnost povrchu. Tuto kapitolu uzavírá hodnocení z hlediska náklonu, řezných parametrů a geometrie nástroje. Jedná se pouze o orientační srovnání několika nástrojů od výrobců FETTE spol. s.r.o., ISCAR ČR s.r.o., Pramet Tools, s.r.o., EMUGE - FRANKEN, s.r.o., ZPS-FN a.s. a Seco Tools CZ, s.r.o. Řešila se závislost průměru přechodového ostří a max. úhlu naklonění nástroje na rozdílné hloubce řezu pro jednotlivé výrobce nástrojů. Úkolem bylo třeba zjistit pro jednotlivé typy nástrojů na jakém průměru a tím i pod jakým úhlem dochází při náklonu ke změně geometrie a k řezání mimo přechodové ostří nástroje. V závěru je uvedeno několik faktorů, které významným způsobem ovlivňují změnu geometrie nástroje při náklonu.

Vzhledem k časové omezenosti a širokého rozsahu daného problému doporučuji se i nadále zabývat touto problematikou a je určitě namístě optimalizovat další zkoumání v náklonu nástroje. Práce je postavena spíše v teoretické rovině, ale pro další aplikování těchto poznatků do praxe tvoří jako literatura důležitou část. Pro budoucí realizaci experimentů nebo zkoušek jsou tyto informace nesmírně důležité. Pokud bude možnost v budoucnu, velice rád bych se k této problematice vrátil. Tato bakalářská práce může navíc posloužit také jako návod či pomocná literatura pro čtenáře, kteří mají potřebu porozumět a prohloubit svoje znalosti a dovednosti v oblasti obrábění tvarových ploch.

Seznam použité literatury

- [1] AB Sandvik Coromant. *Příručka obrábění – Kniha pro praktiky*. 1. vyd. Praha, 1997. 980 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [2] OTÁHAL, D. *Progresivní metody frézování a jejich vliv na proces řezání* : autoreferát disertační práce. Ostrava : VŠB – TU Ostrava Fakulta strojní, 2007. 40 s. ISBN 978-80-248-1455-1.
- [3] *Ball nose milling – image* [online]. [cit. 2010-05-03]
URL: <img.directindustry.com>
- [4] SKOPEČEK, T. *Příspěvek k optimalizaci obrábění forem a zápusťek z tepelně zpracovaných nástrojových ocelí – HSC tvrdé frézování* : disertační práce. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2005. 114 s.
- [5] Frézování - 5 os.cz: *Web o víceosém frézování* [online]. [cit. 2011-04-23]
URL: <<http://www.frezovani-5os.cz/>>
- [6] ZPS: *Frézovací nástroje* [online]. [cit. 2011-02-21]
URL: <<http://www.zps-fn.cz/html/frezy.html>>
- [7] POLÁK, J. *Vysokovýkonné monolitní nástroje* [online]. [cit. 2011-02-21]
MM Průmyslové spektrum. Praha. Zář 2010.
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokovykonne-monolitni-nastroje>>
- [8] SECO: *K=2 Ball nose cutter* [online]. [cit. 2011-02-21]
URL: <<http://www.secotools.com/en/Global/Products/Milling/Copy-milling/The-R21820-K2-Ball-nose-cutter/>>
- [9] MRKVICA, I. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů – 1. část*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008, 148 s. ISBN 978-80-248-1053-9.

- [10] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění* – učební text. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007, 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [11] CIMR, I. *SolidCAM – integrovaný CAM pro SolidWorks* [online]. [cit. 2009-03-09] Dostupné na World Wide Web: <<http://www.design-tech.cz/c/cam/solidcam-integrovaný-cam-pro-solidworks.htm>>
- [12] SADÍLEK, M. *Strategie frézování naklopeným nástrojem*. MM Průmyslové spektrum, 2005, č. 11, s. 52, 53. ISSN 1212-2572.
- [13] Technická příručka obrábění. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ s.r.o. Dánsko: Stibo Graphic. Říjen 2005. C-2900:3-CZE/01
- [14] ZELENÝ, J. *Nástup HSC technologií do průmyslové praxe*. MM Průmyslové spektrum, 2000, č. 6, s. 22, 23. ISBN 80-85986-19-1.
- [15] JASPAR, J. *Nové hvězdy mezi frézami pro nástrojárny a výrobce forem*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č. 5, s. 46. ISSN 1212-2572.
- [16] SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivity obrábění s využitím CAD/CAM systému* : disertační práce. Ostrava : VŠB – TU Ostrava Fakulta strojní, 2005. 123 s., 23 příloh.
- [17] ZELENÝ, J. *Vliv HSC technologií na stavbu obráběcích strojů*. MM Průmyslové spektrum, 2000, č. 6, s. 24, 27. ISBN 80-85986-19-1.
- [18] SADÍLEK, M. *Strategie frézování naklopeným nástrojem – realizace experimentů* [online]. [cit. 2011-02-21] MM Průmyslové spektrum. Praha. Květen 2006.
URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/strategie-frezovani-naklopenym-nastrojem-realizace-experimentu>>